FILOSOFIA DE LA FISICA

Mario Bunge

Ciencia de la Ciencia

ARIEL



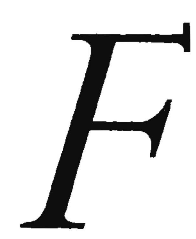
Filosofía
de la física



CIENCIA DE LA CIENCIA

CIENCIA DE LA CIENCIA

1. Mario Bunge
Filosofía de la física
2. Thomas S. Kuhn
La revolución copernicana
3. W. S. Stegmüller
Teoría y experiencia
4. Mario Bunge
Epistemología
5. W. S. Stegmüller
Estructura y dinámica de teorías



Director:
MARIO BUNGE
Foundations and Philosophy of Science Unit McGill University
Codirector:
MARIO H. OTERO
Instituto de Investigaciones Filosóficas
Universidad Nacional Autónoma de México

MARIO BUNGE

ilosofía de la física

Traducción castellana de
JOSÉ LUIS GARCÍA MOLINA
Revisión técnica a cargo del autor

EDITORIAL ARIEL
BARCELONA - CARACAS - MÉXICO

Título original:
PHILOSOPHY OF PHYSICS

1.ª edición: 1978
2.ª edición, corregida: marzo de 1982

Diseño cubierta: TRIANGLE

Depósito legal: B. 3.254 - 1982
ISBN: 84 344 8005 0

Impreso en España

1982. — I. G. Seix y Barral Hnos., S. A.
Carretera de Cornellà, 134, Esplugues de Llobregat (Barcelona)

DEDICATORIA

A quienes emprendieron el estudio de la física por amor a ella y a quienes, pese a los cursos, demandas de resultados sólidos, y presiones del mercado, aún aman su ciencia, no perdieron la esperanza de comprenderla mejor y se atreven a formular preguntas radicales. Pues de ellos es el Reino de los Fotones.

PREFACIO

Este libro se ocupa de algunas de las cuestiones vigentes de la filosofía, metodología y fundamentos de la física. Algunos de tales problemas son:

—¿Se interpretan los formalismos matemáticos por sí mismos o es necesario adjuntarles suposiciones interpretativas, y, en tal caso, cómo han de formularse estas suposiciones?

—¿A qué se refieren las teorías físicas: a sistemas físicos o a operaciones de laboratorio, a ambas cosas, o a ninguna?

—¿Cómo han de introducirse los conceptos básicos de una teoría: por referencia a mediciones, por definición explícita o axiomáticamente?

—¿Cuál es el uso de la axiomática en la física?

—¿Cómo se interrelacionan las diferentes teorías físicas: como cajas chinas o de modo más complejo?

—¿Cuál es el papel de la analogía en la construcción e interpretación de las teorías físicas? En particular, ¿son los análogos clásicos tales como la partícula y la onda indispensables en las teorías cuánticas?

—¿Cuál es el papel del aparato de medición en los fenómenos cuánticos y cuál es el lugar de la teoría de la medición en la mecánica cuántica?

—¿Cómo hace frente una teoría a un experimento: sola o con ayuda de otras teorías?

Éstas y otras varias cuestiones semejantes las encuentran en su tarea cotidiana el físico investigador, el docente y el estudiante. Si soslayadas, retornarán. Y su respuesta errónea oscurecerá el entendi-

miento de lo que se ha logrado, pudiendo incluso obstaculizar el avance posterior. La filosofía, la metodología y los fundamentos, al igual que los rosales, dan gozo si cultivados, pero se tornan feos y espinosos si se los descuida.

No hay prerrequisitos para la lectura de este libro salvo un poco de física teórica de nivel universitario e interés por el tema. El libro puede usarse como lectura independiente y también como texto para un curso semestral a nivel de graduados.

Agradezco al Canadá Council la concesión de una beca de investigación Killan que hizo posible completar este trabajo.

M. Bunge

NOTA A LA SEGUNDA EDICIÓN ESPAÑOLA

He aprovechado la oportunidad brindada por esta segunda edición para corregir los errores y las erratas que se deslizaron en la primera. Debo a mi viejo amigo recientemente fallecido, el Prof. Dr. Carlos E. Prélat, distinguido químico y epistemólogo argentino, el haberme señalado dichas fallas

M. Bunge
Foundations and Philosophy of
Science Unit, McGill University

Montreal, Otoño de 1980

Capítulo 1

LA FILOSOFÍA: GUÍA O TRAMPA*

Hubo un tiempo en que todo el mundo esperaba casi todo de la filosofía. Era el tiempo en que los filósofos trazaban confiadamente las principales líneas de una imagen del mundo dejando en manos de los físicos la servil tarea de completarla en alguno de sus detalles. Cuando se vio que este enfoque apriorístico fallaba, el físico renunció por completo a la filosofía. Hoy nada bueno espera de ella. Tanto más cuanto que la mera palabra "filosofía" suele evocar en él una sonrisa irónica e, incluso, desdeñosa. El físico no tiene tiempo para perder con palabras hueras.

No obstante, no por despreciar la filosofía se salvará de ella. En efecto, cuando decimos que la filosofía no nos interesa, lo que probablemente hacemos es sustituir una filosofía explícita por otra implícita, esto es, inmadura e incontrolada. El típico físico de nuestros días ha descartado los raídos sistemas dogmáticos —que eran mitad incontrastables, mitad falsos, y, en todo caso, en gran medida estériles— sólo para adoptar acríticamente un conjunto diferente de credos filosóficos. Esta filosofía casera, enormemente popular en la profesión física desde comienzos de siglo, se conoce por el nombre de *operacionalismo.* Supone que un símbolo, tal como una ecuación, posee significado físico sólo en la medida en que concierne a alguna posible operación humana. Ello entraña que la totalidad de la física se refiere a operaciones, principalmente mediciones y cálculos, antes que a la na-

* Algunos parágrafos se reproducen de Bunge (1970b) con permiso del compilador y editor.

turaleza, lo cual constituye un retorno al antropocentrismo prevaleciente antes del nacimiento de la ciencia.

El estudioso de la física absorbe la filosofía operacionalista desde el comienzo mismo: la encuentra tanto en libros de texto y cursos como en discusiones de seminario. Rara vez da con escrutinio crítico alguno de esta filosofía, pues usualmente quienes llevan a cabo tal examen son filósofos a quienes no lee. Es más, si siente la tentación de criticar la filosofía oficial de la ciencia, pronto descubrirá que no se le presume tal tarea. El operacionalismo es el credo ortodoxo y es probable que toda desviación sea ridiculizada y aún castigada.

En todo caso, tanto el operacionalista como su crítico filosofan. Filosofar no es cosa rara o ardua: lo que es difícil es hacer buena filosofía, y, más difícil aún, abstenerse por entero de la filosofía. En resumen, el físico no es filosóficamente neutral. Supone, en su mayor parte inconscientemente, un conjunto de credos filosóficos que vamos a examinar a continuación.

1. La filosofía standard de la física

El físico contemporáneo, por sofisticado y crítico que pueda ser en materias técnicas, por lo común adopta dogmáticamente lo que puede denominarse Credo del Físico Inocente. Los dogmas principales de este credo son los siguientes:

(I) La observación es la fuente y objeto del conocimiento físico.

(II) Nada es real salvo que pueda convertirse en parte de la experiencia humana. La totalidad de la física concierne a la experiencia antes que a una realidad independiente. Por lo que la realidad física constituye un sector de la experiencia humana.

(III) Las hipótesis y las teorías de la física no son sino experiencias condensadas, esto es, síntesis inductivas de ítems experienciales.

(IV) Las teorías físicas no se crean sino que se descubren: cabe discernirlas en conjuntos de datos empíricos, tales como tablas de laboratorio. La especulación y la invención apenas cumplen cometido alguno en la física.

(V) La meta de la hipotetización y la teorización es sistematizar una parte del fondo creciente de la experiencia humana y prever posi-

bles experiencias nuevas. En ningún caso se ha de tratar de explicar la realidad. Mucho menos llegar a captar o asir lo esencial.

(VI) Las hipótesis y las teorías que incluyan conceptos no observacionales, tales como los de electrón y campo, carecen de contenido físico: constituyen meramente puentes matemáticos entre observaciones posibles o actuales. Esos conceptos transempíricos no se refieren, pues, a objetos reales pero imperceptibles sino que son sólo auxiliares vacíos de referencia.

(VII) Las hipótesis y las teorías de la física no son más o menos verdaderas o adecuadas; puesto que corresponden a ítems que no existen independientemente, son sólo modos más o menos simples y efectivos de sistematizar y enriquecer nuestra experiencia antes que componentes de una imagen del mundo.

(VIII) Todo concepto importante ha de ser definido. Por consiguiente, todo discurso bien organizado ha de partir definiendo los términos clave.

(IX) Lo que asigna significado es la definición; un símbolo indefinido no tiene significado físico y, por consiguiente, sólo puede figurar en física como auxiliar matemático.

(X) Un símbolo adquiere significado físico merced a una definición operacional. Todo lo que no es definido en términos de posibles operaciones empíricas carece de significado físico y debe, por consiguiente, ser descartado.

Mandamiento más, mandamiento menos, la mayoría de los físicos contemporáneos parecen prestar adhesión al Decálogo que precede —al menos así lo proclaman— no sólo en el mundo occidental sino también en los demás mundos. Ello no implica que todos los que juran por el Decálogo obren conforme a él. De hecho, ningún físico iría muy lejos si tuviese que acatar el Decálogo, pues éste no refleja la investigación real ni la promueve. Es lo que, a continuación, intentaré mostrar —esto es, que el operacionalismo es una huera filosofía de la física.

2. Observación y realidad

El *axioma I*, que hace de la observación la fuente y objeto del co-

nocimiento físico, es parcialmente verdadero: no hay duda de que la observación aporta algún conocimiento rudimentario. Pero incluso el conocimiento ordinario va mucho más allá de la observación, como cuando postula la existencia de entes inobservables tales como el interior de un cuerpo sólido y las ondas de radio. Y la física va mucho más lejos aún, al inventar ideas que posiblemente no podríamos extraer de la experiencia común, tales como el concepto de mesón y el concepto de inercia. Es falso, en suma, que la observación constituya el arranque de todo ítem de conocimiento físico. Tan falso como la presunción de que las buenas observaciones sean las no manchadas de teoría.

Además, considerada como acto, la observación no es cuestión de la física sino más bien de la psicología. Así, la teoría de la elasticidad se refiere a cuerpos elásticos más bien que a las observaciones humanas de tales cuerpos. De no ser así, el especialista en elasticidad observaría el comportamiento de sus colegas físicos antes que el de los cuerpos elásticos, y propondría hipótesis referentes al conocimiento de aquellos en lugar de lanzar hipótesis sobre la estructura interna y el comportamiento manifiesto de los cuerpos elásticos. La verdad es que algunos de los problemas elementales de la elasticidad fueron sugeridos por medio de la observación inteligente (esto es, empapada de teoría) y que toda teoría de la elasticidad debería contrastarse por medio de experimentos que implicaran observaciones. Mas no es esto lo que alega el postulado I.

El *axioma II*, que corresponde a la metafísica, trata de prescindir del concepto de realidad; en cualquier caso, intenta ponerla entre paréntesis durante las investigaciones científicas. Hasta la era del operacionalismo, todo físico pensó que estaba manipulando cosas reales o que tenía ideas relativas a ellas. Es lo que todavía hace cuando trabaja, si bien no cuando filosofa: en tales ocasiones, el realista práctico se convierte a menudo en empirista. Sólo algunos conservadores como Planck y Einstein se atrevieron a sostener, en los días mismos de apogeo del operacionalismo, que la física intenta conocer la realidad. La desconfianza hacia el concepto de realidad parece haber sido heredada de los empiristas británicos y de Kant —vía los positivistas y los pragmatistas— quienes criticaron los alegatos de los filósofos escolásticos y especulativos de ser capaces de captar una realidad inmutable

por debajo de las cambiantes experiencias humanas. Pero esto implica un uso muy especial del término "realidad", uso que posee sólo interés histórico. Y, en todo caso, carece de interés fustigar el caballo muerto de la metafísica tradicional: lo que cuenta es descubrir si la física está realmente vinculada con una metafísica de la experiencia, más bien que con la metafísica más antigua de la substancia, o si no perdona a ninguna de las dos.

Seguramente, la física no excluye el concepto de realidad sino que lo restringe al nivel físico, dejando a otras ciencias la tarea de investigar otros niveles, en particular, el de la experiencia humana. Ninguna teoría física hace la suposición de que su objeto sean sentimientos, pensamientos, o acciones humanas: las teorías físicas se refieren a sistemas físicos. Más aún, aunque la física no se ocupara de la experiencia humana constituiría una radical extensión y profundización de la experiencia humana. Así, producir un haz de partículas de 1 GeV es una experiencia humana nueva y también lo es comprender la dispersión de ese haz por un blanco determinado. Mas la razón de diseñar y ejecutar el experimento como la de elaborar la respectiva teoría, es conocer más acerca de partículas, no acerca de hombres. Asimismo, el astrofísico que estudia las reacciones termonucleares en el interior de las estrellas no las penetra salvo intelectualmente: no tiene experiencia directa de los objetos de su estudio. Con todo, cree o, al menos, espera que sus teorías tengan contrapartidas reales. Desde luego esta creencia, o más bien esperanza, no carece de fundamento: a diferencia del metafísico de antaño, el científico confronta sus teorías contrastándolas con datos observacionales —muchos de los cuales pueden haber sido recogidos a la luz de las mismas teorías que pone a prueba. En otras palabras, mientras que para contrastar nuestras ideas físicas son menester experiencias de varias clases, éstas no constituyen los referentes de aquéllas. El referente propuesto de cualquier idea física es una cosa real. Si esta cosa particular no llega a ser real, tanto peor para la idea. La realidad no parece cuidarse de nuestros fracasos. Pero si despreciamos la realidad o negamos que haya alguna, acabamos rechazando la ciencia y adoptando la peor metafísica posible.

3. Naturaleza de las ideas físicas

El *axioma III*, relativo a la naturaleza de las hipótesis y teorías físicas, extrapola a la ciencia física lo que se acepta como parte del conocimiento ordinario. Es cierto que muchos enunciados generales son síntesis inductivas o resúmenes de datos empíricos. Pero es falso que toda idea física general se forme por inducción a partir de experiencias individuales, v. g., observaciones. Consideremos las fórmulas de la física teórica, incluso las más "duras" —las de la física del estado sólido. Todas ellas contienen conceptos teóricos más o menos sofisticados que están lejos de la experiencia inmediata. Lo que es más, las hipótesis y teorías más que resumir rezuman experiencia, pues sugieren nuevas observaciones y experimentos. No es ésta, con todo, la más importante de las funciones de las hipótesis y teorías: las valoramos primariamente porque nos capacitan para trazar un mapa más o menos esquemático de la realidad y porque nos capacitan para explicarla, aun cuando parcial y gradualmente.

Nada llega a explicarse diciendo que algo es un hecho de experiencia, o asegurando que un enunciado es un paquete de ítems experienciales. La experiencia es algo a ser explicado, y la explicación es tarea de las teorías. En particular, las teorías físicas, más que ser unidades de experiencia enlatada, nos permiten dar cuenta de una vertiente de la experiencia humana, en sí misma parte menuda de la realidad. Pero no bastan, pues toda experiencia humana es un macrohecho con muchos aspectos que ocurre en diferentes niveles, desde el físico al mental, de suerte que una explicación adecuada de la misma requiere la cooperación de teorías físicas, químicas, biológicas, psicológicas y psicosociales. En resumen, las ideas físicas van mucho más allá de la experiencia y es por ello por lo que pueden contribuir a explicar la experiencia. El tercer axioma de la filosofía oficial de la física, es, pues, falso. Es también perjudicial, pues refuerza el mito de que, mientras todos los experimentos son importantes, ninguna teoría es indispensable.

El *axioma IV* es realmente una consecuencia del axioma III: si las teorías son síntesis inductivas entonces no son creadas sino formadas mediante la aglomeración de particulares empíricos, tal como una

nube se forma por la agregación de gotas de agua. La falsedad de esta tesis se sigue de la falsedad del Postulado III, pero puede exhibírsela independientemente recordando que toda teoría contiene conceptos que no están presentes en los datos utilizados para contrastarla. Así, la mecánica del continuo emplea el concepto de tensión interna; pero, como este concepto es inobservable, no figura en los datos usados para apoyar o socavar cualquier hipótesis particular relativa a la forma definida del tensor de tensión.

Un argumento adicional, de naturaleza psicológica, cabe manejar contra el Postulado IV, a saber, el siguiente. Nunca una teoría física ha surgido de la contemplación de las cosas, ni siquiera de los datos empíricos: toda teoría física ha sido la culminación de un proceso creador que va mucho más allá de los datos a mano. Ello es así no sólo por contener toda teoría conceptos que no se encuentran en los enunciados experimentales relevantes a la misma, sino también porque, dado un conjunto cualquiera de datos, hay un número ilimitado de teorías que pueden dar cuenta de ellos. No hay una ruta única desde los datos a las teorías; en cambio, el camino desde las suposiciones básicas de una teoría a sus consecuencias contrastables es único. En resumen, mientras que la inducción es ambigua, la deducción es inequívoca. Además, las teorías no son fotografías: no se parecen a sus referentes sino que son construcciones simbólicas construidas en cada época con ayuda de los conceptos disponibles. Las teorías científicas, lejos de ser síntesis inductivas, son creaciones —sometidas a la contrastación empírica, cierto, pero no por ello menos creadoras.

4. Objetivo de las ideas físicas

El *axioma V*, relativo a la meta de las ideas físicas, es unilateral y presupone que hay una sola meta. Es cierto que sistematizar y ordenar es uno de los objetivos de la teorización, pero no es el único. La tabla sinóptica, la tabla numérica y el gráfico son otros tantos modos de comprimir y ordenar los datos, pero ninguno de ellos basta para explicar por qué las cosas deberían pasar de ésta y no más bien de la otra manera. Para explicar un hecho debemos deducir enunciados que describan ese hecho, y la deducción requiere premisas que vayan más

allá de lo que se está explicando. Estas premisas son otras tantas hipótesis que contienen conceptos teóricos. En resumen, la función principal de las teorías físicas es proporcionar explicaciones de hechos físicos.

Pero hay explicaciones superficiales y otras profundas, y no nos detendremos en las primeras si podemos alcanzar las últimas. Ahora bien, para explicar en profundidad, para ir al meollo de las cosas, debemos conjeturar mecanismos –no necesariamente ni, por lo usual siquiera, mecánicos. Y los mecanismos, salvo los macrofísicos y propiamente mecánicos, escapan a la percepción. Sólo las teorías profundas (no fenomenológicas) pueden dar cuenta de ellos. En resumen, para lograr explicaciones profundas, sea en la física o en cualquier otra ciencia, hay que inventar teorías profundas: teorías que trasciendan a la par la experiencia y las teorías del tipo de la caja negra.

En muchos casos, tales teorías profundas parecen llegar cerca de la esencia de sus objetos –o, más bien, de sus propiedades esenciales o básicas. De ahí que no pueda sustentarse ya más que la física, por no ir más allá de las relaciones y las regularidades, no capta la esencia de las cosas. Hay propiedades esenciales o básicas, tales como la masa y la carga, que originan varias otras propiedades; hay, asimismo, pautas básicas o esenciales, que comportan algunas de estas propiedades fuente, y que dan lugar a pautas derivadas. Seguramente, no hay esencias inmutables que la sola intuición pueda asir. Más aún, toda hipótesis concerniente al carácter esencial de una determinada constelación de propiedades y leyes está sometida a corrección: pero el hecho es que, en la medida en que la física trasciende el enfoque externo o conductista –necesario pero insuficiente–, socava el Postulado V.

5. Conceptos teoréticos y verdad

El *axioma VI* es común al convencionalismo, el pragmatismo y el operacionalismo, al que cabe considerar como la filosofía de la ciencia del pragmatismo. Si se lo adopta, se tira por la borda la mayoría de los referentes de la teoría física y nos quedamos con cálculos vacíos. Pues, lo que caracteriza a una teoría física en contraste con una

puramente matemática, es que la primera concierne, sea correcta o equivocadamente, a sistemas físicos. Si una teoría no se refiere a una clase de sistemas físicos, entonces no es una teoría física. De ahí que el sexto dogma sea semánticamente falso. También es falso psicológicamente, pues si las teorías no fuesen nada sino máquinas de moler datos, nadie se molestaría en construirlas: la finalidad del teórico es producir una versión explicativa de una pieza de la realidad. En resumen, el Postulado VI, es falso en todos los respectos. Pese a ello, le corresponde el mérito histórico de desacreditar el realismo ingenuo; comenzamos ahora a comprender que las teorías físicas no son retratos de la realidad sino que implican simplificaciones brutales que conducen a esquemas ideales, u objetos modelos, tales como los del campo homogéneo y la partícula libre. Reconocemos también que, además de esas primeras aproximaciones, hemos de introducir convenciones tales como las de las unidades de medida. Pero nada de ello convierte a la física en mera ficción o conjunto de convenciones, así como una descripción en lenguaje ordinario de un fenómeno observable no es vacía por ser formulada en un sistema convencional de signos.

En cuanto al *axioma VII*, que trata de eliminar el concepto de verdad, se sigue de la tesis convencionalista. Porque, si la física no se refiere a objetos reales, entonces sus enunciados no son tales, esto es, no son fórmulas más o menos verdaderas (o falsas). Mas semejante doctrina no encaja con la práctica del físico. De hecho, cuando el teórico deduce un teorema, alega que éste es verdadero en la teoría o las teorías a que pertenece. Y cuando el experimentador confirma ese teorema en el laboratorio, infiere que el enunciado es verdadero, al menos parcialmente, en relación con los datos empíricos de que se ocupa. En resumen, tanto el físico teórico como el experimental usan el concepto de verdad y pueden incluso sentirse insultados si se les dice que no van en pos de la verdad.

Seguramente las verdades alcanzables en la física son relativas en el sentido de valer, cuando valen, en relación con ciertos conjuntos de proposiciones que se toman momentáneamente por supuesto, esto es, no se cuestionan en el contexto determinado. Son también verdades parciales o aproximadas, pues la confirmación es siempre parcial e incluso temporal. Pero no por ser relativa y parcial es la verdad una

ilusión. En cuanto a la simplicidad y eficacia adoradas por el pragmatista en lugar de la verdad, no se las encuentra en toda teoría. Las teorías físicas más profundas, tales como la relatividad general y la mecánica cuántica, son también las más ricas. Y la eficacia práctica sólo puede ser obtenida al pasar a la ciencia aplicada o tecnología. Sea simple o compleja, una teoría física no es eficaz o ineficaz sino más o menos verdadera. Una teoría grosera si se aplica con habilidad a fines prácticos puede ser tan efectiva como una teoría refinada, aun cuando normalmente a mayor verdad mayor eficacia. En cualquier caso, la eficacia no es inherente a las teorías: es una propiedad de los pares medios-fines; las teorías figuran entre los medios empleados en la tecnología, pero es sólo en relación con las metas como puede juzgarse su eficacia. El remate es que el Postulado VII de la filosofía oficial de la física es falso.

6. Definición

El *axioma VIII*, que pide que para empezar todo concepto sea definido, es francamente absurdo. Un concepto, si definido, se construye en términos de otros conceptos, de suerte que algunos de ellos deben continuar indefinidos. Así, los conceptos de masa y fuerza son primitivos (indefinidos) en la mecánica newtoniana. No son por ello oscuros o indeterminados, ya que se especifican mediante diversas fórmulas. Una teoría bien construida no parte de un montón de definiciones sino de una lista de conceptos indefinidos o primitivos. Son unidades que, unidas a conceptos lógicos y matemáticos, se presentan una y otra vez en cada fase de la construcción de una teoría. Son los conceptos esenciales o básicos de una teoría, aquellos de los que no se puede prescindir. Todos los conceptos restantes, esto es, aquellos definibles en términos de los primitivos, son lógicamente secundarios. De ahí que el dogma VIII, al que tantos textos tratan de ajustarse, sea erróneo.

El *axioma IX*, que concierne al procedimiento por el que se asigna significado a un símbolo, no vale en general. Las definiciones asignan significado a condición de estar forjadas en términos de símbolos que tengan significado por sí mismos. Y a tales símbolos definidores

no puede asignárseles significado mediante definiciones precisamente por ser definidores, no definidos. Hay que recurrir, por consiguiente, a un medio distinto al de la definición a fin de delinear el significado de un símbolo físico básico o indefinido.

Lo mejor que podemos hacer es formular las tres condiciones que el símbolo debe satisfacer: (*a*) las condiciones matemáticas, esto es, las propiedades formales que se supone posee, (*b*) las condiciones semánticas, esto es, qué objeto físico o propiedad se supone que representa, y (*c*) las condiciones físicas, esto es, las relaciones que se supone mantiene con otros símbolos físicamente significativos de la teoría. Como toda condición de esta clase es un axioma o postulado, vemos que la tarea de asignar significados físicos de modo inambiguo y explícito se realiza mediante la axiomatización de la teoría en la que los símbolos en cuestión figuran. (Más sobre esto en los capítulos 7 y 8.) Así, en la mecánica del continuo "*T*" es un símbolo primitivo que designa un concepto —el de tensión interna— que tiene una forma matemática determinada (a saber, un campo tensorial sobre una variedad de cuatro dimensiones) y un referente determinado (a saber, una propiedad de un cuerpo). Esta última suposición, de naturaleza semántica, no es una convención del tipo de la definición, sino una hipótesis. En efecto, podría resultar ser vacía; más aún, por lo que sabemos no hay cuerpos materiales continuos. Pero la teoría formula la hipótesis de que tales cosas existen. Y si la teoría funciona entonces puede ser que los cuerpos sean casi continuos. En suma, lo que asigna significado a un símbolo físico básico no es una definición sino toda una teoría, con sus tres ingredientes: las suposiciones matemáticas, las semánticas, y las físicas. Caso de que la teoría resultase ser falsa, sus primitivos aun conservarían un significado determinado, aun cuando resultaran especulativos. En cualquier caso, el dogma IX es erróneo, pues sólo los símbolos definidos o secundarios reciben un significado vía las definiciones.

7. Definición operacional

Finalmente, también el *axioma X*, relativo a las llamadas definiciones operacionales, es falso. Cuando se aplica el caso de la intensi-

dad *E* del campo eléctrico, este dogma supone que "*E*" adquiere significado físico sólo cuando se prescribe un procedimiento para medir los valores de *E*. Pero esto es imposible: las mediciones nos permiten determinar sólo un número finito de valores de una función, y más aún producen sólo valores racionales o fraccionarios. Además, el valor numérico de una magnitud o cantidad física es sólo uno de los constituyentes de la misma. Por ejemplo, el concepto de campo eléctrico es, matemáticamente hablando, una función y, por consiguiente, tiene tres ingredientes: dos conjuntos (el dominio y el alcance de la función) y la correspondencia precisa entre ellos. Un conjunto de valores medidos es sólo una muestra del alcance de la función. A menos de tener una idea realmente redondeada de la cosa entera, no se llegaría siquiera a conocer cómo obtener semejante muestra. Esto es, lejos de asignar significados, la medición los presupone.

Es más, las mediciones de valores de *E* son siempre indirectas: los campos son accesibles a la experiencia sólo a través de sus acciones ponderomotrices. Lo que es más, hay muchas maneras de medir valores de *E*. Por lo que si cada una de ellas tuviera que determinar un concepto de la intensidad del campo eléctrico, tendríamos un número de conceptos diferentes de campo eléctrico más que el concepto único que interviene en la teoría de Maxwell. Si queremos saber lo que significa "*E*" debemos inspeccionar la teoría de Maxwell. Los significados no se determinan actuando sino pensando. Sólo cuando contamos con una idea razonablemente clara es recompensante ir al laboratorio. En suma, el axioma X es falso: no hay definiciones operacionales. La creencia de que las hay procede de una confusión elemental entre definir (operación puramente conceptual que no se aplica, además, a los conceptos básicos) y medir —operación que es no sólo empírica sino también conceptual.

Terminamos nuestra crítica al Credo del Físico Inocente. Hemos utilizado unos cuantos instrumentos filosóficos —básicamente, la lógica y la semántica— y unos cuantos contraejemplos tomados de la física. El resultado es claro: en la medida en que nuestra crítica esté justificada, la filosofía realizada de modo explícito puede ser útil para iluminar la niebla que invade la física.

8. Hacia una nueva filosofía de la física

El fracaso del operacionalismo no pone fin a la filosofía de la física. Hay cantidad de alternativas al operacionalismo y durante largo tiempo han estado presentes: casi toda escuela filosófica constituye una. No obstante, la mayoría de las escuelas filosóficas distintas del operacionalismo han fallado en atraer la atención de los físicos, y ello por las siguientes razones. Primero, esas filosofías son obra de filósofos profesionales más que de científicos, y es ciertamente natural (bien que no plenamente racional) que un científico se sienta inclinado a desconfiar de los filósofos y a confiar en su lugar en el colega científico que saca a relucir toda una filosofía por sí mismo y que habla su propio lenguaje. En segundo lugar, las filosofías generales que compiten con el operacionalismo son por lo usual excesivamente generales y, en ocasiones, también oscuras: rara vez se toman la molestia de realizar un detallado análisis de una genuina pieza científica y, de otro lado, acentúan cuestiones extracientíficas (religiosas, políticas, etc.) sin relevancia directa con las teorías o experimentos científicos. Tercero, la mayoría de las filosofías de la física distintas del operacionalismo apenas son relevantes para la física: se despreocupan de casos actuales de teorización y experimentación y se dedican a miniproblemas cuya solución no establecería diferencia en ningún sentido: se les escapan las cuestiones reales o intentan manejarlas sin conocimiento especializado. En resumen, hay al menos dos buenas razones para la falta de interés del físico por la mayoría de las filosofías de la ciencia.

El fracaso tanto del operacionalismo como de las filosofías tradicionales de la física en efectuar análisis filosóficos adecuados de la física, constituye un reto para construir una nueva filosofía de la física. La nueva filosofía de que la física ha menester habría de ser a la par conciencia y propulsora suya: debería ayudar a la física a criticarse a sí misma y explorar a la vez nuevos problemas y métodos. Los ingredientes básicos de esta nueva filosofía de la física (NFF) deberían ser estos:

Ecuación de movimiento: El input específico debería ser la totalidad de la física, pasada y presente, clásica y cuántica. El output correspondiente debería ser una versión realista (análisis y teoría) de procedimientos actuales y óptimos de investigación, de ideas concebidas y concebibles, de metas perseguidas actualmente y metas posibles tanto en la física teórica cuanto en la experimental.

Vínculo: la NFF ha de adecuar su ritmo no sólo a los adelantos de la física sino también a los adelantos relevantes de la filosofía exacta, en particular la lógica y la semántica.

Condición de contorno: La NFF debería elaborar la mayor parte de la tradición filosófica, asimilándola críticamente.

Esta nueva filosofía de la física se encuentra en elaboración: encontraremos muestras de la misma en varios lugares de este libro. Por el momento, señalemos algunos de los problemas que hoy día están siendo investigados dentro del espíritu de la nueva filosofía: ello, más que una enumeración de investigadores y trabajos, puede dar una idea de la vitalidad del campo y de su relevancia para la investigación física actual. Aquí van en feliz desorden:

—La relatividad a un marco de referencia ¿equivale a la dependencia del observador y así a la subjetividad?

—¿La invariancia respecto de transformaciones de coordenadas asegura a la vez el significado y la objetividad?

—¿Los acaecimientos cuánticos son inconcebibles sin la intervención de un observador?

—La teoría cuántica ¿se refiere a objetos físicos autónomos o, más bien, a bloques inanalizables formados por la fusión de microobjetos, instrumentos de medida y observadores?

—¿Son los conceptos de la física estrictamente observacionales?

—¿Cuán observables son los llamados observables de la mecánica cuántica y la relatividad general?

—¿Cuáles son los objetivos de una teoría física: sistematizar datos, computar predicciones, guiar la investigación posterior, y/o explicar hechos?

—¿Es cierto que no podemos explicar sin recurrir a imágenes familiares o modelos pictóricos, y que, en consecuencia, la mecánica cuántica y la relatividad general carecen de poder explicativo?

—¿Es posible realizar experimentos sin ayuda de teorías y colec-

cionar, así, teorías libres de datos?

—¿En qué consiste el significado físico de un símbolo?

Cabe espigar cientos de problemas como éstos en la filosofía actual de la física, en particular, de las revistas *Philosophy of Science*, *British Journal for the Philosophy of Science*, *Synthese*, y *Dialectica*. Por lo demás, tal riqueza de cuestiones (sin mencionar las respuestas) no constituye prueba de que la filosofía de la física, aunque se halle libre de los defectos del operacionalismo o de la filosofía tradicional, cumpla un propósito útil. Ocupémonos de esta cuestión.

9. Las funciones de la filosofía

La filosofía de la física es una rama de la filosofía de la ciencia, junto a disciplinas similares tales como la filosofía de la biología y la filosofía de la psicología. A su vez, la filosofía de la ciencia no es sino una de las ramas de la filosofía —siendo las otras la lógica, la gnoseología general, la metafísica, la teoría del valor, y la ética. Hemos visto que una filosofía errónea puede impedir una comprensión correcta de la teoría física y el experimento. Puede incluso retrasar el progreso en la investigación proscribiendo programas enteros de investigación incompatibles con esa filosofía o fomentando programas superficiales e incluso estériles. ¿Puede la filosofía hacer algo mejor que esto? ¿Puede cumplir en efecto funciones positivas? Ciertamente puede y en ocasiones lo hace. Los ejemplos históricos abundan aunque no hagamos uso de ellos, pues la adopción declarada de una determinada filosofía no prueba su observancia. Estamos interesados en las funciones de la filosofía que son conceptualmente posibles.

La filosofía de la física puede desempeñar al menos cuatro funciones útiles, que pueden llamarse asimilación filosófica, planeación de la investigación, control de calidad, y limpieza de la casa. Explícitamente:

(i) *La asimilación filosófica* de la física consiste en enriquecer la filosofía mediante el tratamiento de las ideas y métodos desarrollados en la física. Merced al análisis del trabajo real de los físicos experimentales y teóricos, el epistemólogo puede concebir hipótesis generales relativas a la naturaleza del conocimiento humano y a los modos

de hacer que crezca o caiga en decadencia. Examinando teorías físicas profundas, el metafísico puede inventar teorías generales acerca de la naturaleza de las cosas. En resumen, la filosofía de la física puede contribuir (y, en cuanto cuestión de hecho, ha contribuido a menudo) a la expansión e incluso la renovación de la filosofía.

(ii) *La planeación de la investigación* se lleva a cabo con alguna u otra filosofía en mente. Si la guía (o mala guía) es una estrecha filosofía empirista, la investigación quedará limitada a la recolección de datos y a teorías fenomenológicas o de caja negra que cubren esos datos sin explicarlos. En cambio, si se adopta una filosofía más liberal entonces no se impondrán limitaciones a la profundidad de la teoría ni a la dependencia de las teorías respecto de los experimentos. En particular, la búsqueda de teorías intrépidas y de nuevos tipos de datos vendrá entonces estimulada más que desacreditada. El presupuesto es sólo un aspecto a ser considerado al programar la investigación: la filosofía de la ciencia es un asunto aún más importante y que determinará parcialmente el tamaño del presupuesto, pues la filosofía configura la meta misma de la investigación. Si el objetivo es multiplicar datos, pídanse más instrumentos y computadoras. Si las metas son encontrar nuevas leyes y contrastar teorías ambiciosas, pídanse experimentadores y teóricos más ingeniosos.

(iii) *El control de calidad* de la investigación consiste en confrontar y evaluar la valía e importancia de los resultados experimentales y teóricos. ¿Son fiables los datos? ¿Son válidos para contrastar teorías, las ponen en movimiento, o plantean cuestiones que exigen nuevas teorías? ¿Son las teorías dignas de crédito? La respuesta a cualquiera de estas cuestiones implica algunas ideas filosóficas sobre la naturaleza de la verdad, el entrejuego de la experiencia y la razón, la estructura de las teorías científicas, y así sucesivamente. Consideremos sólo los diferentes criterios propuestos para evaluar la verdad que proclama una teoría: para algunos, el sello de la verdad es la simplicidad; para otros, la belleza; para la mayoría, una fuerte confirmación empírica; para muchos, el rendimiento tecnológico; y así sucesivamente.

(iv) Por *limpieza de la casa* se entiende, desde luego, el inacabable proceso de aclarar ideas y procedimientos. Seguramente, la formación de nuevos conceptos, hipótesis, teorías y procedimientos fi-

sicos es tarea del físico profesional. Pero someterlos a un escrutinio crítico inquisitivo requiere algún rigor lógico, gnoseológico y metodológico. Y dejarlos vivir para que puedan exhibir su valía requiere una tolerancia que sólo una buena filosofía puede enseñar.

La planeación de la investigación, el control de calidad de los productos finales y la limpieza de la casa implican, pues, alguna filosofía: el físico que emprende cualquiera de estas tareas se convierte en filósofo de tiempo parcial. Y un filósofo de tiempo parcial, si está equipado adecuadamente, utilizará su tiempo al máximo.

10. El papel de la filosofía en el adiestramiento de los físicos

Todo físico que arañe la superficie de su propio trabajo está destinado a vérselas cara a cara con la filosofía aun si no la tiene por cosa cierta. Si reconoce a la bestia, tiene dos posibilidades. Una es dejarse subyugar, esto es, sucumbir a la filosofía prevaleciente que, al ser popular, está obligada a ser grosera e incluso retrógrada. La otra posibilidad es estudiar la bestia esperando domesticarla, esto es, llegar a familiarizarse con algo de la investigación en la filosofía de la física, examinándola críticamente y tratando de ponerla al servicio de su propio trabajo científico.

El físico que rehusa dejarse encadenar por una filosofía anacrónica y quiere mirar a la filosofía considerándola como un posible campo de investigación exacta puede esperar mucho de tal perspectiva. La lectura de filósofos imaginativos puede sugerirle nuevas ideas. El estudio de la lógica levantará sus patrones de claridad y rigor. El hábito del análisis semántico le ayudará a descubrir los referentes genuinos de sus teorías. Una familiaridad con escépticos profesionales le protegerá contra el dogmatismo. La familiaridad con graves problemas no resueltos y con grandes esquemas le estimulará a emprender programas de investigación a largo plazo en lugar de brincar de un pequeño problema de moda a otro. La conciencia de la unidad metodológica de todas las ramas de la física y, por ello, de todas las ciencias, impedirá su superespecialización —una causa importante del desempleo en la crisis de la profesión al momento de escribir. Aunque

más no sea, una pizca de filosofía reforzará la fe del teórico y del experimentador en el poder de las ideas y en la necesidad de la crítica.

En resumen, la filosofía siempre está con nosotros. De donde lo menos que deberíamos hacer es conocerla.

Capítulo 2

FUNDAMENTOS: CLARIDAD Y ORDEN

La mayoría de los físicos no pueden dedicar tiempo a analizar los mismos conceptos, hipótesis, teorías y reglas que crean o aplican: están demasiado atareados en su diseño y uso. Lo que es normal: sería pedante y, a la par, poco provechoso, obligar a todo físico de partículas a un nítido análisis del concepto mismo de partícula. Ello no significa que, en la física, el análisis conceptual carezca de valor: es valioso pero no es necesario comprometer en él a todo el mundo. Por la misma razón, sólo un fanático proscribiría el análisis conceptual como ocupación legítima de algunos físicos: al fin y al cabo, alguien debería analizar e, incluso, refinar lo que otros crean. Una gran empresa como la física ocupa a toda clase de personas: desde experimentadores de varios tipos a teóricos de toda clase: todas estas especies son necesarias para explorar y comprender la naturaleza.

Aún hay otros que contribuyen a la misma meta si bien no es intención suya investigar leyes físicas: son los diseñadores y constructores de instrumentos, y los físicos matemáticos. Los primeros se ocupan de la *artiphysis* más que de la *physis*, y los físicos matemáticos se centran en problemas matemáticos planteados por el desarrollo de las teorías físicas. Sin embargo, no se les desprecia como si fuesen parásitos. El analista de la física se encuentra en posición similar: aunque no se espere que haga descubrimientos sobre la realidad física, puede ayudar a descubrir qué es la física, analizando y con ello elucidando algunos de los conceptos básicos, hipótesis, teorías y procedimientos de la ciencia física. Y su ayuda será aún más valiosa si, además de

analizar la física, contribuye a poner en claro la organización o estructura de las teorías físicas y de los conjuntos de teorías físicas, esto es, si llega a ser un cumplido artesano en fundamentos de la física.

Pocos físicos piensan en la organización de la física. La mayoría se limita a dejarla crecer, y hay quienes se oponen incluso a cualquier tipo de organización. Los matemáticos, en cambio, son sensibles a la organización del álgebra, la topología, el análisis, y, por cierto, de la totalidad de la matemática: han reconocido que el interés por la estructura facilita el desarrollo, al mostrar relaciones, lagunas y defectos que no veían al concentrarse en puntos concretos. Así, durante nuestro siglo, por tres veces el álgebra se ha visto sometida a un minucioso careo, relativo, en primer lugar, a una organización de su material que redundó en su enriquecimiento: primero, merced a la axiomatización, más tarde, a la lógica, y, más recientemente, a la categorización (formulación en términos de la teoría de las categorías). Estas tres revoluciones han aportado al álgebra no sólo unidad sino también una mayor profundidad y alcance. También por tres veces el análisis se ha visto revolucionado en el curso de los últimos cien años: primero, por la aritmetización, después, por la teoría de conjuntos, finalmente, por la topología —por no hablar de la cuarta revolución en curso, a saber, la categorización. Cuando, en la organización de un campo de las matemáticas, se emplea un nuevo concepto (como los de conjunto, estructura, y functor) puede que de ello se siga una reorganización interna y a la vez global: la primera, en relación con teorías determinadas, la segunda con familias enteras (categorías) de teorías. ¿Por qué los físicos habrían de considerar por debajo de su dignidad, trabajar en un proyecto similar, a saber, la organización explícita de la física teórica? ¿Por qué descuidar y no estimular el orden?

En suma, hay multitud de cuestiones concernientes al análisis y organización de la física teórica: mientras que algunas de estas cuestiones son filosóficas, otras son cuestiones técnicas que sólo pueden contestarse con la ayuda de instrumentos técnicos tales como la lógica, la matemática y la axiomática, y así tan improbable es atraer al grueso de los filósofos como improbable es desviar la atención de la mayoría de los físicos. Son cuestiones de fundamentos de la física. Seamos más específicos y procedamos a formular algunas de ellas.

1. ALGUNOS PROBLEMAS ACTUALES EN FUNDAMENTOS DE LA FÍSICA

Un modo práctico de introducir un campo de investigación y mostrar su significación es presentar una lista de sus problemas típicos. Aquí va un rosario de problemas que atraen en la actualidad la atención de varios investigadores en fundamentos de la física, por lo que cabe observar no sólo revisando publicaciones filosóficas sino también revistas de físicas tales como *J. Math. Phys.*, *Progr. Theor. Phys.*, *Rev. Mod. Phys.*, *Inter. J. Theor. Phys.*, *Nuovo Cimento Suppl.*, *Amer. J. Phys.*, y *Foundations of Physics.*

—Exactamente ¿en qué punto, en el desarrollo de una teoría que contenga conceptos espacio-temporales, se hace necesario introducir coordenadas? Equivalentemente: ¿hasta dónde podemos llegar con una formulación libre de coordenadas (de donde automáticamente covariante general)?

—¿Podríamos inferir algunas de las propiedades del espacio-tiempo a partir de ciertas leyes físicas? (No obvio: las ecuaciones de Maxwell no necesitan comprometerse con una métrica.)

—¿Es cierto que el llamado sentido del tiempo ha de buscarse en procesos irreversibles y que el propio tiempo no ha de ser definido en términos de procesos irreversibles?

—¿Es el tiempo realmente equivalente a una dimensión espacial?

—¿Cuáles, si existen, son los límites de la localización espacio-temporal?

—¿Concierne la mecánica cuántica a microsistemas individuales o sólo a conjuntos estadísticos, o incluso pares conjunto-aparato?

—¿Cómo hemos de interpretar las probabilidades que figuran en la teorías físicas: como intensidad de nuestras creencias acerca de los sistemas físicos, como frecuencias relativas de valores medidos, o como tendencias (propensiones)?

—¿Cómo habríamos de interpretar las dispersiones que figuran en las llamadas relaciones de indeterminación: como incertidumbres, como desviaciones standard de conjuntos de resultados de medición, como indeterminaciones objetivas, o acaso de alguna otra manera?

—¿Es posible explicar el azar deduciendo toda teoría estocástica de una teoría determinista más profunda?

—¿Es posible recuperar la teoría cuántica a partir de alguna teoría estocástica clásica?

—¿Requiere la teoría cuántica una lógica propia, v. g., una que excluya la conjunción de enunciados concernientes a los valores exactos de variables dinámicas conjugadas?

—¿Constituye el principio de correspondencia un aparte integral de la teoría cuántica o es una regla que pertenece a su andamiaje heurístico?

—¿Se encuentran los principios de covariancia y los enunciados de simetría (como el teorema CPT), entre los axiomas de una teoría? Y ¿se refieren a sistemas físicos?

—¿Es posible ofrecer una formulación libre del observador de la mecánica cuántica y de la electrodinámica cuántica?

—¿Es posible deducir la mecánica del continuo y la termodinámica de la mecánica de partículas?

—¿Cuáles son las relaciones entre las diversas teorías, en el mapa de la física?

—¿Consiste la explicación mecánica de una propiedad global, tal como el índice de refracción o la conductividad eléctrica, en una reducción del macronivel al micronivel?

—¿Son las cantidades físicas algo más que funciones de cierto tipo?, y ¿cuál es la diferencia, si la hay, entre una cantidad física y una constante dimensional o factor escalar?

—¿Cuáles son las álgebras de las dimensiones y unidades, que subyacen a las reglas standard para su manejo?

—¿Cuáles son las relaciones entre unidades y patrones? Suponiendo que las unidades sean convencionales, ¿qué sucede con los patrones?

Esta breve lista podría utilizarse como cuestionario para medir las actitudes hacia los fundamentos de la física. Así, mientras que para el autor son todas ellas interesantes y algunas constituyen temas de tesis doctoral, es de presumir que muchos las consideren como cuestiones tontas o triviales, o, incluso, irrelevantes para la física. Pero en tal caso muchos otros campos sufren el mismo destino: así, uno de mis profesores sostenía que el magnetismo era un tema muy aburrido, y

yo confieso mi incapacidad para sentir entusiasmo por la acústica clásica. *De gustibus non est dispuntandum.* Lo que realmente importa es si, en un campo determinado, hay problemas abiertos y si la solución de estos problemas marcaría diferencias en nuestra compresión y gozo de la naturaleza de la ciencia natural. Y esto cierto que no lo sabremos, en el caso de los fundamentos de la física, a menos que le demos una oportunidad.

2. La búsqueda de orden y rigor

Dos son las misiones principales asignadas a los fundamentos de la física: aumentar la claridad de las ideas físicas y mejorar su organización. Argüiré que la primera tarea se logra mejor por medio de la segunda. Reemprendamos, pues, la cuestión de la estructura.

Orden y rigor poseen algo más que valor estético: cuanto mejor organizado está un cuerpo de ideas, tanto más fácil resulta su captación y retención (ventaja psicológica) y mejor se presta a la evaluación, crítica, y, eventualmente, a su remplazo por un diferente sistema de ideas. Por estas razones, los matemáticos, desde los tiempos de Euclides, han valorado la formulación axiomática de las teorías. No se trata sólo de gusto ni siquiera principalmente de didáctica, sino, como se insinuó previamente, de metodología: la axiomática es científicamente valiosa por hacer explícitas todas las suposiciones de hecho empleadas y hacer posible a la par mantenerlas bajo control.

Lo que vale para las matemáticas puras, vale, en relación con la axiomática, para cada una de las explicaciones, desde la física, pasando por las ciencias sociales, hasta la filosofía: poca esperanza queda de orden, rigor e incluso relevancia fuera de los sistemas axiomáticos. Pues la axiomática, además de poner orden y poder exponer incoherencias, nos permite detectar las irrelevancias e, incluso, fórmulas enteras que pasan por principios o teoremas profundos sólo por carecer de sentido en el contexto dado. Tres ejemplos de la física contemporánea bastarían para mostrar cómo un poco de axiomática puede ayudar a rechazar a los intrusos que no cumplen función ninguna ni en la computación ni en la medida y que se conservan por la pura fuerza de la autoridad.

Nuestro primer ejemplo es el pseudoconcepto de masa del fotón. Cuando un entusiasta de "$E^2/c^2 = m_o c^2 + p^2$" se refiere a la masa del fotón, cabe recordarle que éste es un predicado huero, pues no figura entre los conceptos básicos de la teoría electromagnética: la fórmula anterior pertenece a la *mecánica* de partículas relativistas —y la mecánica, por refinada que sea, no es competente para dar cuenta de los fotones. Más aún, esa fórmula no es sino el consecuente de una implicación con el antecedente: "Una partícula tiene una masa m, un momento lineal p, una energía E". El condicional recíproco es falso: no puede asignarse a toda energía una masa y un impulso mecánico $p = mv$. Por lo que es erróneo hablar de la equivalencia universal o interconvertibilidad de masa y energía.

Segundo ejemplo: cuando los teóricos e incluso los experimentadores, señalaron una distinción entre la masa inercial y la masa gravitacional (sólo para igualarlas inmediatamente después), puede uno observar que no se ha propuesto ninguna teoría conocida en la que figuren diferentes conceptos de masa en reposo (Bunge, 1967a). Si semejante distinción se entiende seriamente, entonces debe ser formulada axiomáticamente: cada concepto de masa debe caracterizarse por uno o más axiomas y no por observaciones pseudofilosóficas o heurísticas. Si no se hace tal distinción, entonces no son diferentes, y ello es todo.

Nuestro tercer y último ejemplo nos retendrá un poco más por ser ligeramente más complicado: es la llamada cuarta relación de indeterminación. En su última discusión con Einstein sobre problemas epistomológicos, Niels Bohr (Bohr, 1949) alegó que el tiempo y la energía satisfacen una relación de "incertidumbre", similar a la de Heisenberg. Más precisamente aseveró, sobre bases puramente heurísticas, que las desviaciones standard medias $\Delta_\psi t$ del tiempo y $\Delta_\psi E$ de la energía para un sistema mecánico cuántico en un estado ψ se relacionan así:

$$\Delta_\psi t \cdot \Delta_\psi E \geqslant \hbar/4\pi.$$

A diferencia de las genuinas relaciones de indeterminación, la fórmula previa anterior ha sido probada a partir de primeros principios. Más aún, tal como la vemos en la actualidad, no puede probarse de igual modo. De haberlo advertido Einstein, su réplica habría llevado

más peso y la discusión no habría sido considerada por casi todo el mundo como ganada por Bohr.

La razón del fracaso en incorporar la anterior formula a la mecánica cuántica es la siguiente. En esta teoría, como en cualquier otra teoría conocida y exitosa, el tiempo es un "número *c*" y, más particularmente, un parámetro de un cierto grupo de transformaciones: no es una variable dinámica a la par con los operadores de posición e impulso. Más aún, a diferencia de los últimos, t no pertenece a la familia de operadores en el espacio de Hilbert asociado a todo par microsistema-entorno. Por consiguiente, t no es una variable aleatoria: no se asocia con ella ninguna distribución probabilista. De ahí que su dispersión se anule idénticamente:

$$\Delta_\psi t = 0 \quad \text{para todo } \psi$$

(Es más, la dispersión en la energía se anula cuando el sistema resulta ser un estado propio del operador de energía.) En consecuencia, independientemente de lo que pueda ser la dispersión de la energía, la desigualdad propuesta por Bohr y repetida en muchos textos no vale: no pertenece a la teoría cuántica, sea no relativista o relativista (Bunge, 1967a). Cuestión que se habría advertido mucho más pronto si la axiomática física se hubiera tomado en serio. Lo que vale, como observó Lévy-Leblond (comunicación personal), es

$$\delta_\psi t_A \cdot \Delta_\psi E \geqslant h/4\pi, \quad \text{con} \quad \delta_\psi t_A =_{df} \Delta_\psi A / \langle A \rangle_\psi,$$

siendo A una variable dinámica arbitraria. Este intervalo de tiempo, $\delta_\psi t_A$, característico de A y dependiente del estado ψ, no es una desviación standard de t, que no es una variable aleatoria.

3. El axiomatizador y el filósofo

Desgraciadamente, la mayoría de los físicos desconfían de la axiomática, al parecer por creer que axiomatizar es cristalizar u osificar. (Un físico eminente dijo al autor: "La axiomatización es inútil". Otro vino después asegurándole: "No queremos teorías axiomáticas en físi-

ca". En ningún caso se dieron razones: *magister dixit.*) Le guste a uno o no, el hecho es que una teoría formulada intuitivamente no es tanto una teoría cuanto un conjunto de teorías, según los diferentes manojos de suposiciones tácitas que se hagan. Es por ello por lo que cabe axiomatizar cualquier teoría más o menos amorfa de diversas maneras diferentes equivalentes, esto es, adoptando bases diferentes (v.g., diferentes instrumentos matemáticos) y diferentes hipótesis básicas (axiomas). Puesto que axiomatizar es hacer explícito lo que era tácito, los enemigos de la axiomática luchan inconscientemente contra la explicitud y favorecen a sus opositores, esto es, la ambigüedad y la oscuridad. Además, la axiomatización de una teoría no nos fuerza a adoptarla para siempre: más bien al contrario, como la axiomatización facilita el análisis de la teoría y elimina todas las oscuridades que pueda contener, señala el camino a nuevas teorías obtenidas merced al cambio de algunas de las suposiciones. (Véanse los capítulos 7 y 8.)

Cabe replicar que, aun concediendo que la axiomática sea valiosa, no por ello se prueba que la filosofía sea necesaria. Concedido: un buen teórico puede axiomatizar sin disponer él mismo explícitamente de filosofía alguna, tal como no se gana mucho en la vida cotidiana por estudiar lógica. Pero la experiencia muestra que los sistemas de axiomas físicos existentes se encuentran en su mayoría desequilibrados: mientras que algunos de ellos descuidan especificar la condición de los conceptos básicos, otros no especifican claramente qué es lo que éstos representan. Una pizca de filosofía podría evitar los dos extremos del concretismo y el formalismo, pues es una de las tareas de la filosofía examinar la naturaleza de las teorías científicas bien construidas.

Consideremos una vez más el caso del símbolo "E" discutido en el capítulo 1. El intento matemático de axiomatizar la teoría de Maxwell no olvidará ciertamente postular, digamos, que "E" designa un campo vectorial sobre una cierta variedad diferenciable. Pero puede olvidar decir que esta variedad viene a presentar el espacio tiempo, y puede no cuidarse de enunciar que el campo vectorial se refiere a un campo supuestamente real que se expande sobre una región del espacio tiempo. Puede sólo insinuar esta interpretación propuesta o, adoptando acríticamente la filosofía del operacionalismo, enunciar que los valores numéricos de E son los resultados de medidas —que ni son

exactas ni suficientemente explícitas. O, finalmente, suponer que "*E*" es sólo un nombre para la expresión "campo eléctrico"— mediante lo cual reduce el problema semántico al de suministrar reglas de designación.

En este punto, el filósofo puede apuntar que las reglas de designación apenas son otra cosa que convenciones por las que se asignan nombres, mientras que las suposiciones semánticas implican hipótesis concernientes a la existencia de los referentes. (Recuérdese el capítulo 1, sección 5.) Puede protegerse también contra la creencia de que un postulado de interpretación agotará el significado del símbolo en cuestión: o apuntar que los conceptos físicos se especifican también por las suposiciones matemáticas y físicas, y no sólo por las básicas sino también por las derivadas. El filósofo puede recordar al axiomatizador, en resumen, que los significados físicos no deberían menospreciarse y que no debería creerse que pueden asignarse sin ambigüedad por medio de una o dos sentencias. Resumiendo, el filósofo puede ser de ayuda en las más delicadas, bien que no más creadoras, actividades teóricas, a saber, la fundamentación de teorías.

4. La búsqueda de claridad

Otro aspecto de la investigación de fundamentos es el análisis de teorías, en particular de sus conceptos y enunciados distintivos. Este análisis se lleva a cabo usualmente de modo intuitivo o semi-intuitivo, esto es, sin previa axiomatización. Pero todo análisis riguroso requiere que la teoría esté ahí, entera y bien ordenada en lo que a sus fundamentos concierne. Por ejemplo, es absurdo tratar de descubrir si el concepto de campo eléctrico es primitivo o derivado salvo en un contexto teórico definido. Además, el significado de "*E*" puede variar con la teoría . Así, en una teoría *E* referirá a un campo real, substancia que se extiende sobre una región del espacio; en otra teoría, *E* no será sino un símbolo auxiliar, asignándosele significado físico sólo a la fuerza ponderomotriz *e E*. Finalmente, *E* no necesita figurar en una teoría de acción a distancia.

También aquí puede servir de ayuda el filósofo. Por ejemplo, si el físico, vacila en asignar significado físico a "*E*" en una teoría de cam-

po, el filósofo puede presionarle para que dé razón de su vacilación. Si el físico arguye que E no puede medirse directamente, y que ningún campo libre puede medirse, puesto que la misma presencia de un aparato de medida suprime el vacío, el filósofo puede replicar que una crítica similar, caso de extenderse a todos los conceptos teóricos restantes, les privaría de significado. En todo caso, dado que el físico que analiza una teoría física emplea los conceptos filosóficos de teoría, forma, contenido, verdad, y tantos otros, puede esperar crítica o ayuda del filósofo.

La filosofía científica contemporánea (lógica matemática, semántica, metodología, etc.) es pues relevante tanto para los aspectos críticos cuanto constructivos (más bien, reconstructivos) de la investigación de fundamentos. La filosofía ciertamente es insuficiente: el tema debe en primer lugar dominarse. Pero el físico sin competencia filosófica no se encuentra en posición mucho mejor que el filósofo cuando llega a hacer investigación de fundamentos. Así, para descubrir si en mecánica el concepto de masa es definible, un conocimiento de aquélla es necesario pero insuficiente: una prueba de independencia conceptual requiere una cierta técnica originada en la metamatemática y perteneciente ahora a la teoría de las teorías (véase v. g., Suppes, 1967). Otro caso del mismo tipo: todo esfuerzo por dar una definición libre de contexto (esto es, independiente teóricamente) de un sistema simple (v.g., una partícula elemental) está destinada a fracasar. Sólo dentro del marco de una teoría puede el concepto de sistema compuesto definirse en términos de los conceptos de sistema simple y de relación de composición u operación. Desde luego, el experimento puede refutar la suposición de que el sistema en cuestión es simple, por lo tanto, indescomponible: en este caso, habrá que restringir la teoría entera a un dominio más modesto (v. g., para energías bajas) e incluso abandonarla por entero. Pero la cuestión es que el concepto de sistema simple, como cualquier otro concepto, sólo puede definirse en relación con algún contexto teórico: cámbiese el contexto y el concepto puede cambiar e incluso perderse de vista.

Cuando dos disciplinas diferentes son requeridas conjuntamente para hacer una cierta tarea, la cooperación es obligatoria. Tal es el caso de los fundamentos de la física. El físico mal dispuesto a buscar semejante cooperación y que ofuscadamente rehúsa mirar de frente a

la filosofía exacta debe resignarse a continuar ignorante de los errores que podría haber evitado fácilmente con un poco de filosofía. Casos comunes de errores semejantes derivados de una filosofía insuficiente son: la creencia de que masa y energía son idénticas sólo por estar relacionadas; la creencia de que el uso de la probabilidad es siempre indicativa de conocimiento incompleto; la creencia de que las teorías estocásticas exhiben la bancarrota del determinismo; la creencia de que todo lo no aleatorio debe ser causal; la creencia de que todo valor teórico (v. g., el valor propio de una variable dinámica cuántica) es un valor medido —y otros cientos que se repiten acríticamente.

Un análisis exacto de una teoría física sólo puede hacerse después que la teoría ha sido formulada de modo pleno y consistente, esto es, después de haber sido axiomatizada. En ausencia de semejante reconstrucción sólo cabe contar con la propia intuición para atravesar la jungla de fórmulas. Lo que es peor, salvo que la teoría se construya de modo ordenado, se tenderá a seleccionar fórmulas aisladas de la teoría, típicamente la fórmulas de Broglie o de Heisenberg, olvidando de dónde proceden, por tanto, cuál es su significado. Así, aun cuando las fórmulas de transformación de Lorentz se derivan sin dar por sentado instrumentos de medida, se las interpreta usualmente como si refiriesen resultados de medida. Y aunque las fórmulas de dispersión de Heisenberg se deduzcan asimismo sin suponer ninguna medida, a menudo se alega que (*a*) resultan de un análisis de ciertos experimentos mentales (*b*) que dan cuenta de errores de medida o incluso incertidumbres subjetivas concernientes al estado dinámico preciso del objeto.

Sólo cuando la dos teorías en cuestión —la relatividad especial y la mecánica cuántica— se axiomatizan y se las fuerza así al rigor, advierte uno que no se refieren a medidas y que no se ocupan de obsevadores y sus estados mentales. Se advierte entonces que la primera teoría se ocupa de sistemas físicos que existen autónomamente y pueden ser conectados por ondas electromagnéticas. Y se constata que la mecánica cuántica se refiere a microsistemas eventualmente influidos por macrosistemas, que son cosas físicas adicionales más bien que observadores. Las cantidades físicas que uno computa en ambas teorías deben, por consiguiente, recibir significados estrictamente objetivos. Y si éste es el caso de las dos teorías que habrían repuesto al ob-

servador o sujeto en la imagen del mundo, podemos confiar que la totalidad de la física se ocupa en nuestros días del mundo externo tanto como en tiempos de Galileo.

En una teoría bien construida todo posible referente (cuerpo, campo, o sistema cuántico) se menciona al principio: figura en la lista de conceptos básicos o indefinidos. El agregado de un *deus ex machina*, tal como el observador, a los sistemas físicos en cuestión resulta entonces lógicamente imposible en semejante contexto. Sólo al introducir arbitrariamente elementos extraños al nivel de teoremas, esto es, al pasar de contrabando conceptos que no figuran en los axiomas, surgen interpretaciones no físicas (subjetivistas). En resumen: cualquier concepto a ser usado en una teoría ha de ser introducido como primitivo o, por lo contrario, definido en términos de primitivos. Puesto que ni el observador ni el (inexistente) aparato de medida general son conceptos primitivos o definidos en la relatividad especial y la mecánica cuántica, ninguno pertenece por derecho a estas teorías. Si hay que construir teorías de instrumentos de medida y de procesos de medida, deben construirse como aplicaciones de todas las teorías implicadas de hecho en las medidas en cuestión. Más sobre ello en los capítulos 4 y 10.

En suma: el mejor modo de llevar a cabo el análisis de las teorías es en un contexto axiomático: el análisis en contexto abierto está destinado a ser defectuoso. Y ello vale también para el análisis filosófico de teorías y para el análisis de tesis filosóficas acerca de teorías: el mejor modo de evaluar cualesquiera alegatos filosóficos acerca de una teoría (por ejemplo, que confirme un cierto credo gnoseológico) es contemplar la teoría como un todo y depurada de todo anexo que no sea necesario ni para hacer cómputos ni para aplicar la teoría a situaciones reales. Ello no quiere decir que los fundamentos de la física puedan ser filosóficamente neutrales y deban ser absolutamente previos a la filosofía de la física: significa que debe haber un ajuste mutuo de los dos. Unos fundamentos sin filosofía son ilusorios, y una filosofía sin fundamentos es superficial y con frecuencia irrelevante.

5. Lugar de encuentro y campo de batalla

Los fundamentos de la física y particularmente la reconstrucción axiomática de las teorías físicas, son campo adecuado para la cooperación de físicos teóricos y matemáticos, matemáticos aplicados, lógicos, y filósofos de la física. En efecto, son exigibles todas estas habilidades y es probable que ningún individuo solo las domine, de suerte que la cooperación es obligada. Hay que esperar que esta oportunidad no se pierda.

Lo que vale para la cooperación vale para el debate: cuando se llega a disentir en cuestiones filosóficas y puntos de metodología, los fundamentos de la física ofrecen un adecuado campo de batalla. No veo mejor modo de dirimir la cuestión de si una teoría física determinada está comprometida con cierta tesis filosófica, que axiomatizar la teoría y comprobar si esa tesis está de hecho contenida en la teoría, bien explícitamente bien como supuesto. Seguramente, este método es superior a la retórica y a la autoridad. Es una pena que sea usado tan rara vez. Una pena que la mayoría de nosotros prefiramos debatir cuestiones fundamentales de la misma manera acientífica y afilosófica con que discutimos asuntos ideológicos y políticos.

Y basta por lo que respecta a los rasgos relevantes del enfoque filosófico y fundacional de la teoría física. Caractericemos ahora los aspectos estructurales, semánticos y metodológicos de las teorías físicas.

Capítulo 3

PANORAMA DE LA TEORÍA FÍSICA

Dado que el centro de interés tanto de los fundamentos como de la filosofía de la física reside en el análisis y reconstrucción de las teorías físicas, no estará de más partir caracterizando una teoría física en términos generales. A primera vista, parece tarea fácil: en física, una teoría no es otra cosa que un formalismo matemático dotado de interpretación física y capaz de coexistir con otras teorías físicas a la vez que de confrontarse mediante el experimento. Esto se ve claro y suena sencillo pero de hecho es complejo. Consideremos las siguientes cuestiones planteadas o eludidas por la definición previa:

—¿Cuáles, si las hay, son las suposiciones y teorías que una teoría física determinada toma por supuesto: sólo teorías matemáticas u otras también?

—¿Está el formalismo de una teoría física determinado únicamente por las fórmulas clave que queremos sistematizar o hay opciones y, en tal caso, son equivalentes en todo respecto?

—¿Qué se entiende por "interpretación física": un modelo visualizable, un análogo mecánico, la referencia a operaciones de laboratorio, la referencia a objetos externos, o qué?

—¿Qué se quiere decir por coexistencia de teorías: sólo su compatibilidad lógica o también una coincidencia parcial y, por consiguiente, una asistencia y comprobación mutua?

—¿Cómo ha de construirse la frase "contrastabilidad experimental": en cuanto que concierne a toda fórmula de una teoría y al alcance total de cada fórmula, como la posibilidad de ser contradicha por

datos empíricos, como la posibilidad de confirmación plural, o qué?

Éstas son sólo unas cuantas representantes del populoso conjunto de cuestiones que centellean en torno al concepto mismo de teoría física. Cada una de ellas puede hacerse tan profunda y correosa como se desee y muchas de ellas no pueden contestarse sino mediante todo un artículo e incluso un libro. Ello ejemplifica la regla general: *Lo que es obvio para el practicante de una ciencia puede ser problemático para su filósofo.* Comoquiera que no podemos abordar todo posible problema fundacional y filosófico concerniente a las teorías físicas en general, seleccionaremos unos pocos tópicos para su consideración en este libro. Y, a fin de anticipar inacabables malentendidos, comenzaremos fijando la terminología y esclareciendo los supuestos para capítulos futuros.

1. Algunos términos clave

En el lenguaje filosófico, matemático y científico contemporáneo, una *teoría* no es sólo una opinión aislada sino un sistema hipotético-deductivo, esto es, un conjunto de fórmulas generadas por un manojo de suposiciones iniciales con la ayuda de la lógica y de la matemática. En virtud de la generalidad de algunas de las suposiciones iniciales, tanto como por las posibilidades de transformación proporcionadas por la lógica y la matemática, toda teoría es un conjunto infinito de fórmulas. Piénsese sólo en todas las posibles situaciones cubiertas por una ley universal, sea tan modesta como la ley de la palanca de Arquímedes; y piénsese en todas la derivadas de cualquier función que figure en la teoría. Aunque sólo fuera por esta razón, esto es, porque toda teoría es infinitamente rica, una prueba concluyente de la misma está fuera de cuestión. Lo mejor que cabe hacer es confirmar una teoría en un gran número de casos o refutarla en algunos puntos críticos. Aún así, la refutación puede verse tergiversada y cortejada de este modo la confirmación, no sólo al rehusar admitir la prueba adversa pero sospechosa sino también al ajustar algunos de los componentes de una teoría, notablemente los valores asignados a ciertos parámetros. Volveremos sobre ello en el capítulo 10.

Algunas de las suposiciones de una teoría física se denominan *hi-*

pótesis (en el sentido gnoseológico, no lógico). Las hipótesis, sean particulares o generales, van más allá de una mera descripción de situaciones observables: son conjeturas sobre cuestiones de hecho, sean o no tales situaciones parcialmente observables. Así, es hipótesis de la mecánica que hay cuerpos, o que la masa se conserva, o que la tensión de un cuerpo es representable mediante un campo tensorial real y acotado. Algunas de las hipótesis explícitas o implícitas de una teoría física son de naturaleza puramente matemática en el sentido de estipular las características matemáticas de los conceptos en cuestión —v.g., la simetría de un tensor. Otras poseen un significado físico más o menos directo, en el sentido de referirse a propiedades de sistemas reales o de sistemas que se conjetura existen en la realidad.

Las más importantes entre las hipótesis físicas de una teoría son desde luego los enunciados *legales*. Un enunciado legal propónese referirse a pautas objetivas o modos de existencia y cambio de sistemas físicos. No comunica información de situaciones particulares y no nos dice cómo parece el mundo a un observador: un enunciado universal se supone que es universal y libre de observador. Las ecuaciones de movimiento, las ecuaciones de campo, las ecuaciones constitutivas y las ecuaciones de estado son leyes en la medida en que pertenecen a teorías razonablemente confirmadas. Otras hipótesis físicas son las *hipótesis subsidiarias*, tales como condiciones iniciales, condiciones en la frontera y vínculos.

Toda hipótesis física se supone que es matematizable. Pero la forma matemática no nos dice gran cosa sobre el significado físico de la fórmula. Por ejemplo, la fórmula "$E_n = -k/n^2$" podría significar cualquier cosa. Una fórmula sin significado físico fijo podría decirse que es *semánticamente indeterminada*, esto es, indeterminada en cuanto a su significado. Se convertirá en semánticamente determinada tras la adjunción de suposiciones extra, usualmente tácitas, concernientes a algunos de los símbolos implicados en ella. Así, en nuestro ejemplo previo, "E_n" puede referirse a la energía de un átomo tipo hidrógeno en el nivel e*n*ésimo. En un contexto diferente el mismo signo tipográfico "adquiriría" (esto es, se le asignaría) un significado por entero diferente. Tales suposiciones adicionales en cuanto que esbozan el significado físico de los símbolos pueden denominarse *suposiciones semánticas*.

Los *datos*, esto es, los enunciados obtenidos por observación o experimento, constituyen un tipo adicional de suposición inicial. Son iniciales en el sentido de que deben suponerse a fin de producir algunas consecuencias lógicas o teoremas. Pero, desde luego, los datos no se inventan, esto es, no son *a priori*. Tampoco han de obtenerse por la sola experiencia, más bien al contrario, los datos que pueden intervenir en una teoría física han de formularse en términos de la teoría y debe obtenerse con la ayuda de instrumentos diseñados y leídos con la asistencia de otras teorías. En resumen, los datos no vienen dados sino que hay que buscarlos, y, si son relevantes a una teoría física, están empapados de teoría más bien que ser expresión directa de las sensaciones o sentimientos del observador.

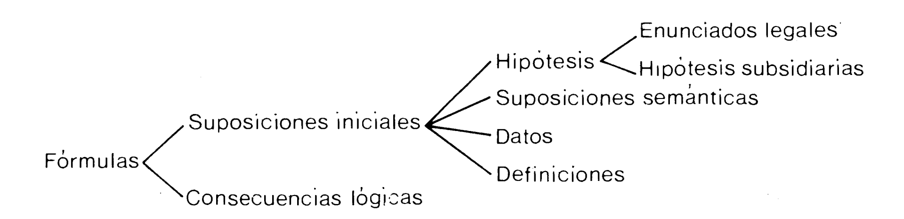
Un cuarto tipo de premisa que se presenta en una teoría es la *definición*, v.g., de la densidad de energía del campo eléctrico:

$$\rho_E =_{df} (1/8\pi)\, E^2 .$$

Formalmente considerada, una definición es sólo una convención lingüística, esto es, una regla para manejar los símbolos en cuestión: nada nos dice sobre la naturaleza. Esta naturaleza convencional de las definiciones no las convierte en arbitrarias: lo que puede y no puede ser definido en una teoría es algo a decidir al reconstruir la teoría de modo axiomático. Y la elección de conceptos definidores (indefinidos, básicos o primitivos) debe ser guiada por criterios definidos tales como la generalidad o la fertilidad.

Notemos la diferencia entre definiciones e hipótesis, en particular, enunciados legales: mientras que las primeras relacionan entre sí conceptos, las últimas relacionan enunciados con la realidad. De ahí que, mientras que las definiciones pueden someterse a la sola crítica conceptual, los enunciados legales se supone que sobreviven además a las pruebas experimentales. No obstante, esta distinción elemental se olvida a menudo. Por ejemplo, la célebre interpretación que dio Mach de la mecánica clásica puede retrotraerse, al menos en parte, a su fracaso en distinguir hipótesis (como la ley del movimiento de Newton) respecto a las definiciones (véase Bunge, 1966).

Hasta aquí, pues, tenemos los siguientes tipos de fórmulas a encontrar en cualquier teoría física dispuesta a ser aplicada para resolver algunos problemas:



Sea cual sea su condición, una fórmula física es una *proposición* o *enunciado* expresado por una *oración* perteneciente a algún lenguaje. (Las oraciones son objetos lingüísticos. Las proposiciones son objetos conceptuales. Uno y el mismo enunciado a menudo ser expresado por diferentes sentencias.) Un enunciado se considera, en cuanto a su tratamiento lógico, como si fuera verdadero o falso. En lo que respecta a su correspondencia con el hecho, podemos no saber cuál puede ser el valor veritativo del enunciado, en otras ocasiones, le asignamos un valor bajo pero no mínimo, y, ocasionalmente, un valor alto pero no máximo. Los enunciados (o proposiciones) obedecen a un cálculo propio: el cálculo proposicional y, más generalmente, el cálculo de predicados. Este cálculo sistematiza las reglas de la inferencia deductiva, tales como:

$$Pa \vdash (\exists x)\, Px$$

que puede leerse así: Que el individuo *a* tiene la propiedad *P* implica que algun(os) individuo(s) ejemplifica(n) esa propiedad. Nótese que *P* es un blanco: representa cualquier propiedad, sea física o no física. El cálculo de predicados es una rama de la lógica, la ciencia presupuesta por cualquier otra disciplina racional y que ningún experimento puede refutar. La razón de esta inmunidad reside en que la lógica no se ocupa del mundo sino de los enunciados y sus transformaciones dejando por entero aparte su contenido. Pese a ello, está de moda alegar que, tal como la relatividad general tuvo necesidad de cambiar la geometría, así la física cuántica obedece a su propia lógica. Esto es erróneo. Todas las teorías cuánticas utilizan las matemáticas ordinarias, que tienen incorporada la lógica ordinaria. Una de las fuentes del error es

adoptar literalmente una analogía formal entre las proposiciones y los operadores de proyección (von Neumann, 1932). Independientemente de a qué álgebra obedezca una familia de operadores, los enunciados en la teoría algebraica obedecen a la lógica ordinaria: un operador es un concepto y no un enunciado.

Tal como las sentencias son descomponibles en palabras, así los enunciados pueden analizarse en conceptos. Los conceptos que figuran en la física son o bien formales o bien factuales. Los conceptos *formales* son los que se obtienen de la lógica o la matemática. Los conceptos *factuales* de la física son peculiares suyos. Son factuales en el sentido de que concierne a cuestiones conjeturadas de hechos. Un concepto factual no precisa ser empírico, esto es, no necesita ocuparse de una situación observacional o experimental. Más aún, para calificarle como físico, un concepto no debe girar en torno a un observador: debe referir a un posible sistema físico, situación o acaecimiento. Más sobre ello en el capítulo 4.

El siguiente bloque ilustra algunos de los conceptos discutidos en esta sección.

Teoría: Teoría electromagnética de Maxwell en el espacio libre.

Conceptos formales (tácitos o manifiestos) *implicados en las hipótesis físicas que siguen:* variedad diferenciable, funciones vectoriales y pseudovectoriales, derivada parcial, producto vectorial.

Conceptos físicos básicos (indefinidos) implicados en las hipótesis que siguen: Espacio físico, tiempo, E, B, c.

Conceptos físicos definidos: $\nabla \times E$, $\partial B/\partial t$.

Definiciones operacionales: ninguna.

Hipótesis: Ley de Faraday de la inducción electromagnética en su versión diferencial:

$$\nabla \times E = -(1/c)\, \partial B/\partial t.$$

Suposición subsidiaria: E y B disminuyen con la distancia al menos tan rápidamente como $1/r$.

Suposición semántica: E representa la intensidad eléctrica, B la inducción magnética y c la velocidad de la luz en el vacío.

Datos: ninguno.

2. El componente matemático

El cometido de las matemáticas en la ciencia moderna es dual: formación de conceptos y computación. No hay concepto de velocidad instantánea sin el concepto de derivada, ni ley de movimiento sin ecuaciones diferenciales o de operadores. Los conceptos matemáticos no son sólo auxiliares cómodos: son el corazón mismo de las ideas físicas. Y la predicción más simple de un estado futuro de un sistema o de la probabilidad de un acontecimiento sería imposible sin el poder deductivo inherente al formalismo de una teoría. Este poder deductivo es tan formidable, y el cálculo efectivo consume tanto tiempo, que, a menudo, tendemos a igualar la física teórica con la computación, olvidando el papel de las matemáticas en la formación misma de los conceptos físicos, fórmulas y teorías.

Las técnicas de computación, bien que indispensables, no son teorías físicas: no son siquiera formalismos matemáticos autosuficientes. Un método de cálculo (v.g., para diagonalizar matrices) forma parte de una teoría matemática que puede (pero no precisa) formar a su vez parte del formalismo de una teoría física. Por sí mismas, las teorías matemáticas son neutrales con respecto a cualquier hipótesis acerca del mundo real. Consideremos la teoría de las transformaciones canónicas, consideradas otrora como el núcleo de la mecánica cuántica. Sea en sus formas clásicas o cuánticas, no es una teoría física independiente que retrate algún aspecto del mundo: es un método matemático para resolver ecuaciones de movimiento (las de Hamilton, Schrödinger, etc.) y para relacionar las soluciones obtenidas en diferentes representaciones. El objetivo global de la teoría es simplificar el enunciado de un problema, esto es, su solución, a la par que preservar la ecuaciones de movimiento y ciertos invariantes. Tanto más cuanto que la teoría puede aplicarse independientemente del contenido físico de las ecuaciones.

Asimismo, la teoría de las perturbaciones puede aplicarse en diversos campos siempre que se obtenga una ecuación definida a la que puedan ser aplicados. Esto es, no conllevan significado físico: son auxiliares matemáticos útiles, medios para alcanzar un fin, que es la solución aproximada de alguna ecuación que pueda tener algún signifi-

cado físico. En un desarrollo de perturbaciones cabe asignar a uno o dos términos un contenido físico a cada uno. Los infinitos términos en la serie total no podrían posiblemente ser interpretados. La neutralidad de significado del método de las perturbaciones puede verse a su vez analizando el concepto de orden de un efecto. P: ¿Qué significa esta expresión: nos dice algo sobre la naturaleza? R: nada sobre la naturaleza, sólo algo sobre nuestra técnica de computación. Así, un efecto de cuarto orden es el que viene dado por un modelo teórico que implica un desarrollo de perturbaciones hasta el 4.º grado, esto es, que desdeña todas las potencias superiores (aun si la serie diverge). El mismo efecto podría recibir explicación de diferentes teorías que adscriban órdenes diferentes —o ninguno, pues una teoría así podría dar una solución exacta. Lo mismo vale, desde luego, para todo desarrollo en serie y toda descomposición de un vector en componentes: mientras que la función como un todo puede ser físicamente significativa, el modo de descomposición es puramente matemático y puede cambiarse casi a voluntad.

El contenido físico, si lo hay, debe buscarse en algunos de los conceptos y enunciados de una teoría, no en una *representación* particular de propiedades y leyes. Por ejemplo, una y la misma trayectoria en el espacio ordinario puede formularse en cualquier tipo de coordenadas. Toda transformación de coordenadas genera una nueva representación sin cambiar los contenidos físicos. Tanto más cuanto que las únicas restricciones válidas a los cambios de transformación provocados por las transformaciones de coordenadas son (i) las variables transformadas deberían tener el mismo significado que las antiguas (v. g., la transformación de Lorentz de una coordenada de posición debería ser una coordenada de posición no una coordenada de tiempo); (ii) las variables transformadas deberían obedecer los mismos enunciados legales que las antiguas. Lo que vale para sistemas de coordenadas vale también para unidades. Mientras que la representación de una propiedad física por una función implica una elección de unidades, éstas son convencionales, y, consiguientemente, los cambios de unidades no comportan significado físico.

Que algunos conceptos de una teoría física estén vacíos de contenido físico es menos sorprendente que la posibilidad de asignar un significado físico a otros. En efecto, nos hemos acostumbrado a la idea

de que las matemáticas están vacías de significado físico. Hemos sabido, en primer lugar, que una función continua no precisa ser una magnitud dependiente del tiempo; más tarde, supimos que la geometría carece de compromiso a menos que se le sobreimpongan suposiciones semánticas. Algunas personas todavía tienen que aprender que la aritmética y la teoría de la probabilidad son igualmente neutrales y, por consiguiente, deben adjuntárseles suposiciones semánticas si han de llegar a ser aplicables, pero, a grandes rasgos, hemos llegado a comprender que la matemática es una disciplina autónoma aun cuando muchas ideas matemáticas hayan sido motivadas por la investigación científica. Y aun así, con toda su pureza, las matemáticas se han aplicado en la física —o, como nuestros predecesores solían decir, "la matemática es aplicable a la realidad". P: ¿Cómo es eso posible? R: Mientras que todo símbolo que figura en una teoría posee algún significado matemático, algunos símbolos matemáticos reciben, *además*, una interpretación física. Así "dX/dt" puede interpretarse no sólo como la derivada total de una cierta función X, sino *también* como la velocidad instantánea de cambio de alguna propiedad física representada por X, tal como una coordenada de posición, concentración, energía, o lo que corresponda. Un contenido físico cabalga así sobre un signo matemáticamente significativo y de este modo tanto el caballo (o el burro) como el caballero cruzan la arena física. (Por supuesto, cabe decir todo esto en términos no metafóricos. Decirlo es tarea de la semántica de la ciencia: véase Bunge, 1973a, b.)

Un concepto físico difiere de su subyacente concepto matemático en dos respectos: (i) todo concepto físico concierne a algún sistema(s) físico y (ii) todo concepto físico forma parte, al menos, de una ley física. En contraposición, los conceptos puramente matemáticos no tienen referentes extramatemáticos y no obedecen a leyes extramatemáticas. Tómese, por ejemplo, la relación "más pesado que o tan pesado como", o H. Desde un punto de vista formal, H no es nada sino una relación de orden $\geqslant$ en algún conjunto B de objetos no especificados: esto es, $H \subset B \times B$ y $H \in$ Conjunto de relaciones de orden. H se convierte en concepto físico cuando (i) B es interpretado como el conjunto de cuerpos y (ii) H se supone que es conexa en B, esto es, vale entre dos cuerpos cualesquiera.

El ejemplo de la función de peso es aún más instructivo por cuan-

to hay infinitos modos equivalentes de representar la propiedad física del peso (o cualquier otra propiedad física), a saber, uno por sistema de unidades. El peso de un cuerpo $b \in B$ en un campo gravitatorio $g \in G$, relativo a un marco de referencia (físico) $k \in K$ y contado según la unidad $u \in U_W$, es un cierto número no negativo w; esto es, $W(b, g, k, u)=w$. El peso en general es la misma función W más bien que cualquiera de sus valores. Y esta función aplica el conjunto $B \times G \times K \times U_W$ de todos los cuádruplos $< b, g, k, u >$, con $b \in B$, $g \in G$, $k \in K$ y $u \in U$ (el conjunto de unidades de peso) al conjunto R^+ de números reales no negativos:

$$W: B \times G \times K \times U_W \rightarrow R^+ .$$

Más aún (y aquí llega la ley) W es tal que $W(b, g, k, u)=m\ddot{X}$, donde m es la masa y $\ddot{X}$ la aceleración del cuerpo b. (Nuestra tácita restricción al modelo de partículas no relativista de un cuerpo carece, desde luego, de importancia en este contexto.) Cualquier otra magnitud tiene una estructura similar: es alguna función de un producto cartesiano con, al menos, dos factores, un conjunto de sistemas físicos de algún tipo y un conjunto de unidades.

Muy frecuentemente, uno de los conjuntos de los sistemas físicos que figuran en el dominio de una magnitud es el conjunto de marcos de referencia de algún tipo, v. g., los marcos en relación con los cuales valen las leyes del movimiento de Newton. Tales marcos se denominan en ocasiones "observadores" de acuerdo con una filosofía centrada en el observador, a saber, el operacionalismo. Pero obviamente los observadores no son tan ubicuos ni silenciosos como los marcos de referencia y, en todo caso, su estudio no pertenece a la física. En suma, los significados físicos se instilan en un formalismo a través de cantidades físicas básicas que representan propiedades de los sistemas físicos y obedecen leyes físicas.

El análisis que precede descalifica a la numerología en cuanto enfoque serio de la teoría física. La numerología puede definirse como un malabarismo con constantes sin dimensión (números puros) con la idea de producir relaciones significativas. Como la numerología se ocupa tan sólo de constantes sin dimensión, es difícil asignarle un contenido físico. Y como el deporte de los números puede jugarse en un computador sin alimentarle con enunciados legales, la numerolo-

gía no puede conducir, salvo por accidente, a leyes físicas. Más aún, es trivial, como lo muestra el siguiente

TEOREMA. Dados n números no negativos $a_1, a_2, ..., a_n$, existen infinitas n-tuplas de números reales no nulos (positivos o negativos) $b_1, b_2, ..., b_n$ tales que

$$a_1^{b_1} \cdot a_2^{b_2} \ldots a_{n-1}^{b_{n-1}} = a_n^{b_n} .$$

(Prueba: tómense en primer lugar logaritmos y considérese $n=2$. Aplíquese entonces la inducción matemática.) Una vez que se ha encontrado una determinada n-tupla de exponentes, es fácil aproximarse a cada uno de ellos por una fracción simple. Así se habrá producido una relación "sorprendente". El procedimiento puede entonces repetirse con diferente elección de exponentes, y así *ad infinitum*. Nuestro éxito en encontrar semejantes combinaciones numéricas depende de nuestra habilidad y recursos. No se requiere ningún conocimiento de ninguna ley. Ello no invalida la numerología en cuanto instrumento heurístico ocasional y débil: los juegos numéricos pueden conducir ocasionalmente a intuiciones e incluso alumbrar una teoría propiamente dicha. Pero la cuestión es que la numerología no es una teoría y no implica leyes físicas. Ello ha de acentuarse porque cada vez que se acumulan datos indigestos (como en el caso de la física de partículas y la cosmología de estos días) hay una tendencia a tratar de jugar a los malabares con ellos más que a arriesgar hipótesis profundas que puedan dar cuenta de semejantes datos.

Y con esto basta en cuanto al papel de las matemáticas en la física. Volvamos ahora al otro extremo del espectro, a saber, los datos.

3. EL COMPONENTE EMPÍRICO

Usualmente, se han evitado dos extremos en la física teórica: uno es la teoría *a priori* que no quiere ni necesita datos, el otro es la teoría que acepta todos los datos posibles, incluso los conflictivos. Toda teoría física genuina, por falsa que sea, deja sitio a algunos datos: datos mutuamente compatibles de determinada especie, esto es, relativos a sistemas físicos de cierto tipo y en estados definidos. Y toda teoría fí-

sica puede producir nuevos datos posibles, esto es, predicciones —o retrodicciones— en número ilimitado si es enriquecida con premisas particulares adecuadas. (Véase la sección 4.) Una teoría vacía de poder predictivo no puede usarse ni, por consiguiente, someterse a contrastaciones empíricas.

La capacidad predictiva de toda teoría física digna de su nombre es tan notable que ha nutrido el punto de vista instrumentalista según el cual las teorías científicas, lejos de ser figuras del mundo, no son otra cosa que dispositivos para producir datos. Esta opinión popular es totalmente falsa: si una teoría no concierne a la realidad y si no incluye enunciados legales no puede hacer predicciones o sus predicciones no se cumplen. Si se observa esta restricción, una teoría científica puede entonces considerarse, en efecto, en cuanto a propósitos puramente prácticos (esto es, dejando de lado la explicación), como una fábrica de datos.

Una teoría física debe aceptar algunos datos reales como inputs y debe poder generar de ellos otro conjunto de datos posibles (el output) de modo tal que tanto input y output se adecuen a las suposiciones de la teoría —leyes, vínculos, etc. Este concepto de adecuación implica la *relevancia*: así, las condiciones de contorno son relevantes sólo para teorías tipo campo como la hidrodinámica y la mecánica cuántica. Pero adecuación es más que relevancia: es también *compatibilidad* lógica. Así, el dato (imaginario) "La velocidad de propagación del campo F es infinita", aun si verdadero, sería incompatible con la teoría (imaginaria) del campo F y por consiguiente no podría intervenir en él para calcular nada. Una forma particular de compatibilidad es la *ejemplificación*: así, una entropía inicial es un ejemplo de un valor de entropía y compatible, pues, con cualquier teoría que contenga el concepto de entropía siempre que los valores de las otras cantidades físicas vinculadas con la entropía no estén fijados independientemente. Tal como sucede con el input así sucede con el output de los datos: se adecuarán a la teoría si los cálculos son correctos. Este proceso no puede dejar de generar datos significativos potenciales en virtud de las leyes incluidas en la teoría. En resumen, el esquema lógico es:

$$\{Teoría,\ datos\} \vdash Predicciones$$

Este esquema vale independientemente del tipo de teoría física: puede ser fenomenológica como la teoría de las redes eléctricas, o puede implicar algún mecanismo como una teoría de la conductividad en la física del estado sólido. Puede ser estocástica como la mecánica cuántica o no estocástica ("determinista") como la relatividad general. Nótese también que, mientras que el conjunto de datos en el esquema anterior es finito, el conjunto de predicciones es potencialmente infinito: lo que obtenemos al final de un cálculo en la física teórica no es sólo un manojo de números sino un conjunto de funciones interrelacionadas. Y los rangos de estas funciones poseen al menos la cardinalidad de los números naturales.

En esta abundancia no hay nada mágico ni tampoco inducción: aunque los datos incorporados a la teoría son finitos en número, al menos algunas de las hipótesis son universales: se supone que rigen para todos los objetos posibles de un tipo, todos los posibles valores de una variable "independiente", y así sucesivamente. Esta universalidad se da por supuesto, tanto que usualmente descuidamos anotar los cuantificadores apropiados al frente de las ecuaciones de que se trata. Tal descuido no es admisible en una formulación axiomática. Por ejemplo, al formular en forma completa la ley de Faraday de la inducción electromagnética deberíamos poner como prefijo la siguiente frase: "En cualquier punto en la variedad espacio-tiempo, para todo campo electromagnético y todo cuerpo cargado, existe un marco de referencia tal que" —y aquí sigue la primera terna de Maxwell.

La precedente versión de la interdependencia entre teoría y datos da por sentado el rechazo del punto de vista según el cual las teorías son sólo resúmenes de datos, a lo más, ligeras extrapolaciones más allá de los datos. Si las teorías no fueran sino resúmenes de datos no anticiparían datos, y no digamos en número infinito, mucho menos datos diferentes en tipo de los alimentados en ellas, como cuando se calculan los campos a partir de cargas y corrientes. Además, si una teoría fuese sólo un concentrado de datos posiblemente no podría entrar en conflicto con ningún dato. Y seríamos incapaces de comprender (explicar) nada sin la ayuda de teorías: pues un montón de datos, por importantes que sean, es algo a ser explicado, no una explicación. La opinión datista ignora no sólo la naturaleza de las teorías sino también su papel en la educción de datos. En física, un dato es usual-

mente un item sofisticado que no puede siquiera enunciarse a menos de aceptar algunas teorías.

Tomemos, por ejemplo, una huella en una cámara de burbujas o en una emulsión nuclear. A fin de interpretarla como huella producida por una partícula debemos hipotetizar: (*a*) que ha habido tal partícula, (*b*) que la partícula estaba eléctricamente cargada, pues eso es lo que nuestras teorías requieren para que una partícula deje una huella, (*c*) que la partícula puede interactuar con el material y (*d*) que la partícula hipotética satisface, al menos, la ley de conservación de la energía y del impulso pues sólo esto nos capacitará para leer algunos números a partir de las cantidades medidas (longitud y densidad de las huellas). De no suponer este teorema de conservación sería imposible detectar partículas neutras y estimar los valores de sus masas: la hipótesis es, en efecto, la base teórica del método de la masa ausente. Todo fracaso de las huellas observadas en adecuarse al teorema de la energía y conservación del impulso podría atribuirse bien al fracaso de este último, bien a la presencia de una o más partículas neutrales que arrastraron una fracción del impulso input. Los físicos experimentales confían en la teoría, al menos en este punto: suponen que las hipótesis valen y así pueden descubrir (o más bien, descubrir-inventar) una cantidad de partículas neutrales.

El papel de las teorías en la experimentación es entonces no menos importante que el papel de los datos empíricos en la activación de teorías y en su contrastación. Así, el astrónomo necesita la óptica para diseñar y corregir sus telescopios, por su parte, el físico de partículas necesita teorías que expliquen el funcionamiento de sus detectores: de lo contrario, podría estar contando los propios latidos de su corazón; y todo el que usa un galvanómetro o incluso una humilde balanza está confiando en la teoría de su instrumento. Toda teoría que concierna a un dispositivo experimental o a un componente del mismo puede denominarse teoría *instrumental*, mientras que la teoría que está siendo activada o contrastada es una teoría *substantiva*. Volveremos a esto en el capítulo 10.

El referente de una teoría instrumental es así un artefacto, tal como una emulsión nuclear, más que un objeto natural, tal como un rayo cósmico. Ningún artefacto viene aludido específicamente por teorías substantivas aun si son suficientemente generales para cubrir

alguno de los muchos aspectos de un instrumento. No obstante, algunas teorías extremadamente generales tales como la teoría relativista de la gravitación y la mecánica cuántica se exponen a menudo en términos de instrumentos y medidas, tales como la lectura de un reloj y la difracción a través de un sistema de ranuras. Tales referencias son hueras, porque las teorías generales no se comprometen con equipos especiales. En general, las teorías relativistas no hablan de relojes sino del tiempo: si se ocuparan de relojes (*a*) tendrían que contener suposiciones particulares acerca de relojes reales de algún tipo (relojes de péndulo, relojes atómicos, relojes láser, etc.) y (*b*) se precisarían teorías especiales de relojes: sería posible utilizar teorías relativistas para computar, digamos, la transferencia periódica del impulso al péndulo, la fricción como función de la velocidad, y otras características de cualquier reloj de muñeca. Para mejor o para peor, una teoría del reloj es una aplicación muy especial de una teoría general, usualmente la mecánica. Lo mismo vale para los dispositivos de medida hueros que figuran en las formulaciones operacionalistas de las teorías cuánticas: tales instrumentos no podrían concebirse y ejecutarse sin la mecánica cuántica y varias teorías adicionales.

La interdependencia entre teoría y experimento refuta la opinión particular según la cual la física (y la ciencia en general) es como un fruto con un hueso duro rodeado de suave pulpa: el hueso sería un conjunto de datos y la pulpa las teorías construidas en torno al primero. Tanto el hueso como la pulpa estarían en continuo crecimiento (el hueso llevando a la pulpa) pero, mientras que los primeros crecerían acumulativamente, las teorías serían mordisqueadas por nuevos experimentos. Esta opinión puede refutarse de dos maneras: mediante contraejemplos y mostrando que no se adecua al método actual de investigación. En cuanto a los primeros, basta mencionar los siguientes: (a) desde que se anunció la "violación" (refutación) de la conservación conjunta de carga y paridad, una secuencia oscilante de medidas han resultado en datos experimentales alternativamente positivos y negativos; (b) en la física del estado sólido, donde la pureza de la muestra es esencial (pues vestigios de una impureza pueden resultar en macropropiedades), el desacuerdo entre experimentadores igualmente competentes es frecuente: los datos del estado sólido son no menos fluidos que otros.

En relación con la insostenibilidad de la analogía del fruto, dos puntos deberían bastar. El primero es que los experimentadores manejan materiales reales, que rara vez son puros, y los manipulan en medio de un entorno activo y contaminado compuesto de aire y una diversidad de campos. Dado que semejantes condiciones no pueden siempre controlarse ni siquiera detectarse, los diferentes investigadores no pueden menos que obtener resultados diferentes bajo "las mismas" condiciones pues, en cuanto cuestión de hecho, ninguna condición determinada puede ser replicada exactamente. Todo lo que el experimentador puede hacer es (*a*) suprimir más y más fuentes de discrepancia (v. g., mejorar el aislamiento), (*b*) registrar más y más exactamente cuáles son las condiciones actuales y (*c*) corregirlas con ayuda de teorías. Aún así los datos, si exactos, están destinados a ser un tanto discrepantes: el consenso exacto huele a coincidencia fortuita. El segundo punto metodológico concierne a la relevancia de la teoría para el experimento. Se produce información empírica de interés a la luz de alguna teoría (por embrionaria que sea) y con la ayuda de algunas teorías instrumentales.

En resumen, los datos pueden ser tan propios de controversia como las teorías. Ningún perjuicio duradero puede resultar de la blandura de datos y teorías si ambos se mantienen en mutua confrontación. Esta posibilidad de permanente corrección bilateral es más típica de la ciencia que cualquier ensayo y error errático, o crecimiento acumulativo, o revolución total.

Resumamos nuestra discusión de las interrelaciones teorías-datos:

(i) *Los datos pueden estimular la creación de teorías.* Lo harán si son anómalos (incompatibles con alguna teoría) o si, habiendo sido obtenidos con teorías instrumentales fiables, ninguna de las teorías substantivas disponibles tiene cabida para ellos.

(ii) *Los datos pueden activar teorías.* Al incorporar datos a una teoría, ésta puede usarse para producir explicaciones y predicciones específicas.

(iii) *Los datos pueden servir de contraste para las teorías.* Al confrontar las predicciones teóricas con los datos, el valor de verdad de las primeras puede evaluarse. No obstante, los datos apenas pueden enjuiciar por sí mismos: el veredicto de otras teorías, que se adjunten, debe ser oído.

(iv) *Las teorías pueden guiar la búsqueda de datos.* Primero, mediante la predicción de efectos previamente desconocidos. Segundo, ayudando a diseñar dispositivos experimentales.

(v) *Los datos ciegos son tan inútiles como los aislados.* A menos que teorías bien confirmadas hayan participado en la producción de un dato, no debería confiarse en él. Y salvo que el dato sea compatible con, al menos, algunas de las hipótesis bien corroboradas, es una rareza que podría explicarse por algún error sistemático en el diseño del experimento o en su lectura.

(vi) *Las teorías carecen de contenido observacional.* La información empírica (v. g., las temperaturas iniciales) deben introducirse en una teoría desde el exterior si cualquier información potencial posterior (predicción) ha de ser deducida. Consecuentemente, (*a*) las teorías no pueden ser inferidas de datos y (*b*) las teorías físicas no pueden ser interpretadas en términos empíricos (v. g., en términos de longitud y medidas de tiempo) sino que (*c*) deben ser interpretadas en términos físicos objetivos, esto es, con referencia a sistemas físicos libres de observador.

4. Teoría general y modelo

La mecánica del continuo es una teoría extremadamente general: describe cuerpos de todo tipo. Es tan general que no puede resolver ningún problema particular a menos que se le adjunten suposiciones especiales concernientes al sistema de que se ocupa. En cambio, la mecánica de partículas es una teoría especial —tan especial que puede resolver problemas de unos cuantos tipos. Y la teoría clásica del oscilador armónico es un caso todavía más especial—un modelo teórico de un vibrador libre. De modo similar, la teoría general de los campos cuantificados es tan general que con ella sólo, ninguna sección de choque puede ser calculada. En cambio, la electrodinámica cuántica es una teoría más específica y la teoría del efecto Compton otra todavía más especial, a saber, un modelo teórico de la dispersión elástica de fotones por electrones. En ambos casos, la teoría especial, y en particular del modelo teórico de un sistema, se obtienen mediante la adjunción de suposiciones subsidiarias a un marco general —por

ejemplo, mediante la especialización del hamiltoniano o agregando ecuaciones constitutivas (leyes materiales).

En resumen,

{*Teoría general, Suposiciones especiales*} $\vdash$ *Teoría especial*

En campos jóvenes no hay disponibles marcos generales: uno dispone a lo sumo de un modelo teórico, esto es, una teoría especial, que cubre una especie estrecha más que un género amplio de sistemas físicos. Y, tanto si se dispone de una teoría general como si no, si lo que se desea es tratar de un tipo específico de cosas, v. g., líquidos en movimiento turbulento o núcleos atómicos bombardeados por protones, entonces debe construirse un modelo, esto es, una idealización o boceto de la cosa real, idealización que destaque algunos de sus rasgos característicos. En otras palabras, un modelo teórico de un sistema incluye un modelo del mismo, esto es, una representación esquemática del sistema real o conjeturado. Este modelo en ocasiones se denomina *objeto modelo.* La tabla I ilustra algunas de las ideas que hemos discutido.

TABLA I

Sistema	Objeto modelo	Modelo teorético	Teoría general
Luna	Sólido esférico que gira en torno a su eje, que rota en torno a un punto fijo, etc.	Teoría lunar	Mecánica clásica y teoría de la gravitación
Luz lunar	Onda electromagnética polarizada plana	Ecuaciones de Maxwell para el vacío	Electromagnetismo clásico
Pieza de vidrio	Cadena lineal aleatoria de cuentas	Mecánica estadística de cadenas aleatorias	Mecánica estadística
Cristal	Retículo más nube de electrones	Teoría de Bloch	Mecánica cuántica

Echemos una ojeada al primer ejemplo. Cuando a la mecánica clásica y a la teoría clásica de la gravitación se adjuntan suposiciones

especiales y datos concernientes a un cuerpo particular, se produce una teoría especial acerca de ese cuerpo. Así tenemos las teorías lunares, las teorías de Marte, de Venus, etc. Los enunciados de nivel inferior de estas teorías son expresiones para las coordenadas (geocéntricas esféricas) del cuerpo en cuestión. Estas funciones resuelven las ecuaciones de movimiento y consisten en series de Fourier. A fin de lograr valores numéricos uno ha de asignar al tiempo un valor definido y sumar la serie. El proceso de sumación es aproximado: se conserva sólo un número finito de términos en el desarrollo. Cualquier discrepancia entre la teoría especial y los resultados de observación puede imputarse bien a errores de observación bien a alguno de los ingredientes del modelo teórico. Por lo común, las discrepancias se atribuyen a términos menospreciados en la serie. Éste es el caso de las célebres "inconsistencias gravitacionales" (extraño nombre erróneo) en la usual teoría lunar, descubiertas en fecha tan reciente como 1968. Sería insensato pasar por encima de las discrepancias —v. g., en los efectos relativistas especiales o generales. Uno confía en el marco teórico general —pero entonces sólo porque, si va unido a suposiciones especiales, rara vez conduce a tales discrepancias con los datos. No obstante, en principio, todos los ingredientes son sospechosos: la teoría general, las suposiciones especiales, el objeto modelo, la computación e incluso los datos. Sólo el formalismo matemático subyacente está fuera de sospecha— si, en efecto, es consistente.

No hay computación específica, por tanto confrontación con los datos, sin algún objeto modelo, o boceto del sistema físico en cuestión. Un *objeto modelo*, unido a un conjunto de enunciados legales y otras premisas, produce un *modelo teórico* de la cosa real. Denominando a ésta R y a su modelo M, podemos escribir: $M \triangleq R$, que se lee '*M representa a R*'. Toda representación es parcial: no abarca (y no debería) todo rasgo singular del objeto representado. Inversamente, algunos rasgos del modelo M pueden no corresponder a nada en su referente R, esto es, pueden ser redundantes. La naturaleza parcial de la correspondencia modelo-cosa está bien ilustrada por los dos objetos modelos más simples (más pobres): la masa puntual y la caja negra. La masa puntual o partícula no es una cosa sino un modelo de un cuerpo. Puede construirse como una lista (n-tuplo ordenado) con los siguientes items: un punto en el espacio ordinario, masa, y velocidad.

(Todas sus propiedades restantes son derivables de éstas.) Y el concepto de caja negra puede considerarse como un par sistema-entorno junto con tres funciones: input, transductor y output.

En cualquiera de ambos casos, el modelo sin configuración y sin estructura, sea punto o caja negra, va cargado con la responsabilidad de representar un sistema natural con una configuración y una estructura que o bien se ignoran o bien son, de hecho, irrelevantes para el propósito a mano. Los detalles del objeto representado se pierden así o se borran deliberadamente. Echemos una ojeada más cerrada a esta correspondencia parcial en el caso de la relación partícula-cuerpo:

MASA PUNTUAL	CUERPO
Posición del punto	Región del espacio
Velocidad del punto	Campo de velocidad
Masa	Distribución de masa
Fuerza sobre la masa puntual	Fuerza de cuerpo
———	Fuerza de contacto
———	Tensión
———	Distribución de corriente eléctrica
———	Campo (E, B)
———	Campo (D, H)
———	Distribución de temperatura
———	Densidad de entropía
———	Etc.

Si un modelo de cuerpo continuo M' sustituye al modelo puntiforme M como imagen de un cuerpo real, obtenemos otro modelo o representación del mismo objeto y consiguientemente un modelo teórico diferente del mismo. Cualquiera de los modelos de cuerpo continuo M' (con o sin propiedades electromagnéticas y termodinámicas) es más rico que M: hay una función de la lista M a cualquiera de las listas M' pero no inversamente. En general: de dos objetos modelo M y M' de un sistema físico R, M' es *más complejo que* M si y sólo si hay

una correspondencia f de M a M'. Y dos modelos M y M' de un objeto concreto determinado son igualmente complejos si hay una correspondencia f entre M y M'. Los modelos más complejos no son necesariamente más verdaderos pero tienen más oportunidades de serlo así.

Ningún objeto modelo es propiedad exclusiva de una teoría determinada. Por ejemplo, puede suponerse que la masa puntual puede satisfacer cualquier número de ecuaciones de movimiento: puede así ser compartido por un número de modelos teóricos. En general: cualquier objeto modelo dado puede, dentro de ciertos límites, incrustarse en una variedad de teorías alternativas. En efecto, puesto que un objeto modelo es sólo una lista de rasgos, estos rasgos pueden caracterizarse y relacionarse mutuamente en un número ilimitado de modos para producir otros tantos modelos teóricos. Inversamente, cualquier teoría general puede unirse a objetos modelos alternativos siempre que los últimos se construyan con conceptos que figuren en la estructura general. (Esta advertencia es importante pero a menudo se olvida en conexión con la mecánica cuántica: más de una dificultad conceptual de esta teoría surge del tozudo intento de injertar en ella objetos modelo clásicos como los de la partícula y la onda.)

Todo ello tiene importantes consecuencias metodológicas. Una primera consecuencia es ésta: la refutación empírica de un modelo teórico determinado no constituye una refutación de la teoría general subyacente si hay alguna. Ejemplo 1: las ligeras inexactitudes en la teoría relativista del campo gravitacional del sol, deberían atribuirse a la solución de Schwarzschild, que supone un modelo puntual del sol. Ejemplo 2: el fracaso de las teorías existentes de la fuerzas nucleares en dar explicaciones satisfactorias de la estabilidad, estructura y transformaciones de los núcleos atómicos no refuta la mecánica cuántica: cabe atribuirlo a los modelos particulares (v. g., hamiltonianos) que se han supuesto hasta aquí.

Una segunda consecuencia metodológica de la distinción entre teoría general, modelo teórico y objeto modelo es ésta: estrictamente hablando, las teorías generales son incontrastables. En efecto, por sí mismas no pueden resolver ningún problema particular, por lo que no pueden generar predicciones específicas. Sólo los modelos teóricos pueden confrontarse con datos. Por ejemplo, la mecánica general de

los cuerpos continuos es incontrastable sin ulterior trabajo. En cambio, la mecánica de partículas, subteoría muy especial de ésta (modelo teórico) es contrastable. (Pero siendo especial no puede generar la teoría general, pese a los valerosos esfuerzos de los libros de texto por construir cuerpos a partir de puntos.) En resumen, sólo teorías especiales (modelos teóricos) son contrastables, y lo son en virtud de contener objetos modelos definidos (Bunge, 1969,a).

Aun así, debemos recordar que ninguna teoría contrastable es *plenamente* contrastable. En primer lugar, por ser imposible comprobar cada uno de sus enunciados infinitamente numerosos. (Recordemos la sección 1.) En segundo lugar, porque incluso un teorema de nivel inferior, digamos una solución de una ecuación de campo, nc puede comprobarse para todo valor de las variables "independientes", entre las que deben contarse las variables objeto, esto es, las que nombran el objeto en cuestión. En tercer lugar, porque cualquier conjunto de datos determinado es compatible con un número ilimitado de fórmulas de nivel superior diferentes. Incluso un determinado conjunto de enunciados legales puede subsumirse bajo axiomas ampliamente diferentes: así, cualquier conjunto determinado de ecuaciones del movimiento puede derivarse de un número ilimitado de lagrangianos alternativos. En cuarto lugar, por poseer toda teoría potente un número de enunciados muy por encima del fundamento empírico, tales como las fórmulas para la posición y velocidad de un electrón en un átomo. En suma, mientras que las teorías pueden ser apoyadas o socavadas mediante confrontación por muestreo, no pueden ser probadas. Aun su refutación es un asunto complejo (bien que no imposible) debido al número de componentes más o menos inciertos en juego.

Esta última incertidumbre relativa al valor (valor de verdad) de las teorías científicas ha inspirado un sesgo antiteórico que se expresa a menudo en el intento de limpiar las teorías de sus ingredientes transempíricos o no observacionales. Semejante programa no es viable y ello por definición de "teoría científica": una teoría científica es un sistema hipotético-deductivo: esto es, un sistema basado en hipótesis, esto es, enunciados que trascienden las observaciones en el sentido de que conciernen a clases enteras de hechos, no sólo los que resultan ser observables. Además, la observabilidad, o, más bien, la mensurabilidad, depende de la teoría: sin teoría no buscaríamos los datos más in-

teresantes y exactos. (Más sobre ello en el capítulo 10.) El progreso de la ciencia no consiste en una eliminación progresiva de inobservables sino en su proliferación y domesticación. Un inobservable inescrutable, que de alguna manera esté vinculado con efectos observables, es tan valioso al menos como una variable directamente manipulable y, seguramente, mucho más valioso que cualquier número de observaciones no ayudadas por la teoría.

Para concluir enumeremos los principales tipos de problemas que el físico teórico tendrá probablemente que enfrentar:

(i) Dada una colección de datos, encuéntrese un conjunto de fórmulas que sean satisfechas por esos datos. Siéntase libre de inventar conceptos no observacionales siempre que sean escrutables.

(ii) Dado un conjunto de fórmulas que cubran datos, fusióneselas en una teoría. Siéntase libre de inventar hipótesis de gran alcance siempre que en lo principal sean susceptibles de confrontación empírica.

(iii) Dada una colección de teorías especiales (modelos teóricos), encontrar una teoría general. Siéntase libre para rechazar algunas hipótesis y generalizar otras.

(iv) Dada una teoría general, agreguénsele suposiciones especiales para obtener un modelo teórico. Siéntase constreñido por el problema dado.

(v) Dado un modelo teórico, obténgase un conjunto de predicciones. Siéntase ligado por los datos.

(vi) Dado un conjunto de predicciones, obsérvese su rendimiento y sáquense inferencias acerca de la valía de las premisas. Siéntase libre para modificar las últimas cuando sea necesario, a la par que para descartar datos inciertos.

Hemos dado la vuelta al círculo entero: la experiencia genera problemas teóricos, algunas de cuyas soluciones nos devuelven a la experiencia. Cada fase de este ciclo es sólo eso: una fase que no tiene valor separada de las fases restantes. Necesitamos recordar esto en un momento en que la profesión física se halla escindida en constructores de instrumentos, experimentadores, físicos teóricos con un pie en los experimentos, físicos teóricos con un pie en las matemáticas, físicos matemáticos, e investigadores de fundamentos. Un mérito de la filosofía es recordarnos el todo que subyace a esa división del trabajo.

Esto completa nuestro panorama de las teorías físicas. Los capítulos subsiguientes se centrarán en un número de problemas fundacionales y filosóficos concernientes a teorías físicas. El primero de ellos será la cuestión: ¿A qué se refieren las teorías físicas? Esto nos arrastrará a los debates sobre realismo, subjetivismo y convencionalismo, que han marcado la filosofía de la física durante los últimos cien años.

Capítulo 4

LOS REFERENTES DE UNA TEORÍA FÍSICA *

Se reconoce generalmente que la física teórica se ha encontrado en las dos últimas décadas ante un callejón sin salida. En particular, no ha habido progresos revolucionarios en el dominio de la física de "partículas": no existen teorías generales con poder predictivo en este campo. Muchas dificultades técnicas formidables se encuentran en el camino, pero también hay ciertos obstáculos filosóficos que fácilmente podrían dejarse a un lado. El principal de entre ellos es la confusión e incertidumbre vigentes en lo que concierne a los referentes de las teorías físicas fundamentales, el tipo de cosas de que tratan (Bunge, 1971a). Pues si tales teorías se refieren al lenguaje, como se ha alegado ocasionalmente, entonces es obvio que debemos dirigirnos a la lingüística para guiarnos en el laberinto. Si conciernen a proposiciones, deberemos pedir a la lógica que proporcione las respuestas a las apremiantes cuestiones de la física de partículas. En cambio, si toda teoría sobre microsistemas se refiere a un bloque observador-aparato-objeto que no cabe analizar en mayor grado ("la globalidad esencial de un fenómeno propiamente cuántico" de Bohr [Bohr, 1958a, p. 72 y passim]), entonces obviamente no puede esperarse análisis más fino. Pero si, en cambio, la física debe introducir la mente del observador como factor separado y determinante en la imagen del mundo (Wigner, 1962; Heitler, 1963; Houtappel *et al.,* 1965), entonces hay esperanza para la física, siempre que aúne esfuerzos (o, más bien, desfallecimien-

* Algunos parágrafos se reproducen de Bunge (1969b) con permiso del compilador y editor.

tos) con la psicología. Y si, finalmente, la física se refiere a cosas que se presume están ahí, entonces su tarea continúa siendo la tradicional de lograr conocer más y mejor sobre ellas antes que proclamar la victoria final o retirada al estudio del yo. En todo caso, identificar los referentes de una teoría física no posee sólo importancia filosófica: afecta a la estrategia misma de la investigación científica.

1. El problema de la interpretación

1.1. *El Referente*

Aquello a lo que un constructo (concepto, proposición o teoría) se refiere, o más bien se propone referir, se denomina el *referente (hipotético)* del constructo. El referente de un constructo puede ser un objeto singular o cualquier número de objetos; puede ser perceptible o imperceptible; puede ser real o imaginario, y así sucesivamente. En cualquier caso el referente de un constructo es una colección de items y se denomina, por consiguiente, la *clase de referencia (hipotética)* del constructo. Por ejemplo, la clase de referencia del concepto "frío" es el conjunto de cuerpos y la de "La tierra gira" es {Tierra}, mientras que los referentes de la nueva ecuación de ondas relativista de energía positiva, de Dirac, no han sido identificados hasta la fecha.

Algunas clases de referencia son *homogéneas*, esto es, compuestas de elementos de un tipo singular —v. g., átomos de deuterio. Otras clases de referencia son *inhomogéneas*, esto es, compuestas de elementos de distintos tipos, tales como protones y sincrotones, o átomos y campos externos. Una clase de referencia compuesta de entidades de los tipos A y B puede concebirse como la unión $A \cup B$ de los conjuntos correspondientes. Un constructo se dirá que *refiere* a una clase A sólo en el caso de que el conjunto A se incluya en la clase de referencia del constructo.

Nuestro problema es descubrir la naturaleza de la clase de referencia de una teoría física. En particular, queremos reconocer si la clase de referencia de una teoría física está constituida, aunque sólo sea en parte, por sujetos cognoscentes —v. g., observadores— o por sus estados mentales. Pues hay poca duda de que algunas de las ex-

presiones que figuran en los escritos físicos se refieren legítimamente, al menos parcialmente, a sujetos cognoscentes. Tales expresiones se denominarán *expresiones pragmáticas*, en contraposición a *expresiones de objetos físicos*, libres de toda referencia a sujetos cognoscentes. Por ejemplo, "El valor de la propiedad P para el objeto físico x es igual a y" es una sentencia (o, más bien, esquema de sentencia), mientras que "El observador z encontró el valor y para la propiedad P del objeto físico x" es un esquema de sentencia pragmática. Claramente, mientras que en el primer caso se hace referencia sólo a un sistema físico, en el último caso hay dos referentes: un sistema y un observador. O, si se prefiere, mientras que en el primer caso la cuestión es el *valor* de una cantidad física, en el otro la cuestión es un *valor observado* o estimación empírica de la misma cantidad, esto es, de su valor para un determinado observador. La diferencia puede parecer menuda pero es significativa, tanto científica cuanto filosóficamente, como en breve se mostrará. Basta ahora señalar que, mientras la precedente sentencia de objeto físico tiene la forma: $P(x) = y$, la correspondiente sentencia pragmática puede analizarse como: $P'(x, z) = y$, o aún mejor, como: $P'(x, z, t, o) = y$, donde t simboliza la técnica de medición y o la secuencia de operaciones empledas por el observador z al instrumentar esa técnica para medir P en x. Hemos elegido el nuevo símbolo P' para designar la propiedad medida porque representa a algo patentemente diferente de P: en efecto, mientras que la función P se define en un conjunto X de objetos físicos, la función P' se define en el conjunto $X \times Z \times T \times O$ de los cuádruplos objeto físico-observador-técnica de medida-secuencia de actos. Volveremos a este punto en la sección 2.

Apenas es discutible, pues, que el lenguaje de la física contiene sentencias pragmáticas. (Y también metasentencias pragmáticas como "Nadie sabe si la hipótesis de los quarks es verdadera".) Lo que está en controversia es la tesis de que *todas* las sentencias no matemáticas que figuren en cualquier *teoría* física son sentencias pragmáticas en el sentido de que uno al menos de los componentes de la clase de referencia de una teoría física es un conjunto de sujetos humanos, tales como observadores calificados. En otras palabras, lo que todavía es asunto de opinión entre los físicos es el problema semántico de identificar el referente de una teoría física cualquiera como sistema fí-

sico, como sujeto, como síntesis sujeto-objeto, o, finalmente, como par sistema-objeto. En resumen, lo que aún se controvierte es la interpretación de los símbolos físicos y, en particular, la interpretación de las fórmulas de la física teórica: ¿son enunciados de objeto físico, o, por el contrario, enunciados de objeto mental, o acaso sentencias físico-mentales, o, finalmente, enunciados de objeto mental, en parte físicas, en parte mentales? Antes de precipitarnos a escoger la respuesta correcta debemos conocer qué posibilidades de interpretación hay.

1.2. *Interpretación: Estricta y Adventicia*

Por arbitraria que pueda ser la hermenéutica teológica la interpretación de las fórmulas científicas no debería ser asunto de gusto. Para empezar, la interpretación asignada a los símbolos básicos o indefinidos de una teoría científica, no debería convertir a ésta en inconsistente y debería hacerla verdadera —o, para ser más realista, máximamente verdadera. (Por ejemplo, sería erróneo interpretar el cuadrado de la función de ondas como densidad de masa, pues ello sería inconsistente con la condición de normalización.) Segundo, si un símbolo se define o deriva en términos de signos previamente introducidos, entonces su significado debería "fluir" del último en lugar de ser cocinado *ad hoc*. (Por ejemplo, es erróneo interpretar la derivada temporal del promedio de una coordenada de posición como una velocidad promedio a menos que la variable pueda interpretarse como representante de una posición física, lo que está lejos de ser obvio en la mecánica cuántica relativista.) En tercer lugar, una interpretación estricta de una expresión compleja debería ser compatible con la estructura de la última; en particular, si se alega que un cierto símbolo complejo concierne a una cosa de un determinado tipo, entonces, uno al menos de los constituyentes del símbolo debe ser capaz de denotar esa cosa particular. (Por ejemplo, para que la función de ondas se refiera tanto a un microsistema como a un aparato, debe depender, de hecho, de variables de ambos, lo que es la excepción más que la regla.)

Las condiciones previas parecen obvias y, sin embargo, con frecuencia se han ignorado. La primera condición carece sin más de sentido por lo que a la mayoría de las formulaciones teóricas respecta,

pues se aplica sólo a sistemas de axiomas: en efecto, sólo en un contexto axiomático tiene sentido la dicotomía básico/definido. La segunda condición se viola siempre que una cantidad definida (o fórmula derivada) se interpreta en términos que son ajenos a los términos definidores (o a las premisas, según el caso). Esta condición se viola, por ejemplo, cuando la entropía de un sistema físico, computada sobre la base de los datos y suposiciones concernientes al propio sistema, se interpreta como cuantía de información que posee el sujeto acerca del sistema, aun cuando no se aporte ninguna premisa concerniente al sujeto y a su fondo de conocimiento. En cuanto a la tercera condición, su violación viene ejemplificada en el siguiente caso típico. Si alguien alega que una fórmula tal como "$y = f(x)$" concierne a la f-idad (sea lo que fuere semejante propiedad) de un objeto x de un cierto tipo X, según es observada por un observador z de algún tipo Z, entonces está introduciendo una variable fantasmagórica, a saber, z. Esta variable (y el conjunto entero Z) es huera por carecer de base: para que algo cuente como referente genuino debe valer la relación de referencia a algún signo, y, en el caso anterior, ningún símbolo semejante correspondiente al alegado observador z figura en la expresión dada. (Como se verá en la sección 3.2, la teoría cuántica standard de la medida contiene tales variables vacías.)

Una interpretación de una variable (no formal o descriptiva) se denominará *estricta* si asigna la variable a un solo objeto. Si se asigna una interpretación estricta a todo símbolo no formal, se dirá que la expresión es interpretada de modo a la par estricto y *completo*. Si uno al menos de los símbolos pero no todos ellos se interpretan de modo estricto, entonces la interpretación se denominará estricta y *parcial*. Toda interpretación que no sea estricta y parcial se denominará adventicia. Por ejemplo, la interpretación del símbolo "$v(x, y)$" como la velocidad de un sistema x es estricta y parcial; su interpretación como la velocidad de un sistema x relativa a un marco de referencia y es, a la par, estricta y completa; y su interpretación como la velocidad de un sistema x relativa a un marco de referencia y según medida por un observador z con la técnica t, es adventicia en lo que a las variables z y t concierne.

Claramente, una interpretación estricta y completa es preferible a cualquiera incompleta y redundante: no debería ni dejar de leer algu-

nos de los componentes del significado de un símbolo ni leer demasiado en él. No obstante, no todas las interpretaciones estrictas dan lugar a fórmulas verdaderas y no todas las adventicias a fórmulas falsas. Que una interpretación estricta puede llevar a la falsedad se muestra interpretando, digamos, las fórmulas de la termodinámica en términos de probabilidad subjetiva. Que una interpretación adventicia puede ser verdadera, aun si trivialmente, es igualmente claro: así, en el ejemplo de una función f que relaciona dos variables, si f es la correcta y el experimentador hace su trabajo adecuadamente, obtendrá valores de f cercanos a los calculados. Pero el experimentador puede hacer una chapucería, en cuyo caso la interpretación adventicia se hace falsa. También, acentuar de tal guisa el rol del experimentador puede crear la impresión de que el objeto le debe su f-idad, en cuyo caso la interpretación adventicia se hace equívoca. Tales riesgos no se corren con interpretaciones estrictas. Por consiguiente, debemos tratar con frialdad las interpretaciones adventicias.

1.3. *Interpretaciones pragmáticas*

Desde comienzos del operacionalismo hubo una fuerte tendencia a interpretar toda expresión lingüística en términos pragmáticos. Esto sucede no sólo en relación con fórmulas susceptibles de contrastación empírica sino también en relación con fórmulas matemáticas. Es práctica común en el aula, donde posee algunas virtudes didácticas, y es la marca del intuicionismo matemático —el compadre matemático del operacionalismo físico. Aun así, todas las interpretaciones pragmáticas de los símbolos matemáticos son adventicias, pues objeto de la matemática es abstraer de utilizadores y circunstancias a fin de lograr a la par la universalidad y la libertad respecto de su compromiso con los hechos.

Una interpretación estricta de la expresión "z^*", donde z designa un número complejo, es ésta: "z^*" significa la parte real de z menos i veces la parte imaginaria de z. (Esta regla de designación podría ser remplazada por una definición.) En contraste, una interpretación pragmática del mismo símbolo es ésta: "Todo el que se enfrenta con el símbolo "z^*" debe invertir el signo de la parte imaginaria de z".

Una segunda interpretación pragmática de "z^*" se da bajo la forma de regla o prescripción: "Para computar z^* a partir de z, inviértase el signo de la parte imaginaria de z". Una tercera lectura pragmática del mismo símbolo sería una instrucción capaz de ser puesta en un computador de suerte tal que posibilite el manejo del símbolo. Toda interpretación pragmática de un símbolo lógico o matemático puede concebirse como una instrucción para el manejo (v. g., cómputo) del símbolo de modo efectivo.

Dado un símbolo matemático, cabe asignarle diversas interpretaciones pragmáticas, según el utilizador, las circunstancias, y las metas (v. g., en conexión con diferentes tipos de computadores). Esta pluralidad de interpretaciones pragmáticas es posible porque siempre que conciernen a símbolos matemáticos son adventicias: esto es, no están sujetas a las leyes matemáticas internas que los mismos símbolos satisfacen. (En efecto, las matemáticas puras nada nos dicen de utilizadores, circunstancias o metas.) Hay que esperar, por consiguiente, que sólo un subconjunto de las interpretaciones pragmáticas concebibles de un símbolo matemático será válido. En cualquier caso, necesitamos un criterio de validez. Propondremos ahora uno que se aplica a símbolos a la par matemáticos y factuales.

Estipulamos que una interpretación pragmática de un signo será *válida* sólo en el caso de que exista una teoría que contenga ese signo y tal que proporcione una base o razón para el procedimiento indicado por la interpretación pragmática. Así, la aritmética proporciona una base para (justifica) las instrucciones dadas a los niños para manejar un ábaco, tanto como las instrucciones puestas en un computador con objeto de encontrar, digamos, una determinada potencia de un entero dado. Una interpretación pragmática se denominará *inválida* sólo en el caso de no ser válida. Así, interpretar una fórmula química en términos pragmáticos que impliquen sortilegios y no, por ejemplo, acciones de mezclar, agitar, o calentar, quedaría expuesta al cargo de invalidez, pues no hay teoría que proteja una relación entre estructura química y sortilegios. Asimismo, la intepretación de la entropía como medida de nuestra ignorancia es inválida, pues supone la identificación errónea de la mecánica estadística con la epistemología. (Nótese que "válido" no conduce a "correcto". Así, una interpretación pragmática inválida o injustificada, puede resultar ser correcta,

pues cabe construir una teoría que la justifique. Inversamente, una interpretación pragmática válida puede resultar ser errónea, pues la teoría que la apoya puede haberse rechazado.)

Queda por ver si a las fórmulas de la física teórica cabe asignarles interpretaciones pragmáticas válidas. (Véase sección 2.) Lo que apenas es discutible es que las interpretaciones pragmáticas se encuentran en su casa en la física *experimental*, donde la referencia a observadores y circunstancias de observación es legítima y, a menudo, explícita. Aquí encontramos los dos tipos de interpretación pragmática: estricta y adventicia. Empecemos con la primera. Una expresión tal como $f(x,y)=z$ puede, en principio, interpretarse de esta manera: "La f-idad de x, según es observada (y medida) por y, es igual a z". Puesto que la fórmula deja espacio para el referente pragmático y, la interpretación precedente es a la vez estricta y parcialmente pragmática. Pero, desde luego, toda interpretación semejante debe ser sólo *parcialmente* pragmática si ha de contar como sentencia en el lenguaje de la física, ya que esta ciencia sucede que se ocupa de sistemas físicos. En segundo lugar, la variable y debe designar un observador posible, no mítico, como el observador en el infinito (o aún peor, la corriente continua de observadores) que imaginan algunos teóricos de campo. En tercer lugar, y debe ser una variable en el sentido intuitivo: esto es, un cambio en el valor de y debe inducir alguna diferencia en el valor de f. En resumen, sujetas a ciertas restricciones, *algunas* fórmulas físicas pueden recibir una interpretación *estricta* que es *parcialmente pragmática*.

Pero las interpretaciones pragmáticas más comunes que se encuentran en la literatura física de nuestro siglo son adventicias más bien que estrictas: esto es, no asignan significado a cada una de las variables de un símbolo complejo sino que toman a éste en bloque y lo adecuan a un item pragmático externo. Así, dada una sentencia s perteneciente a un lenguaje físico, es frecuente encontrar en la literatura las siguientes interpretaciones pragmáticas: (*a*) "s resume las medidas realizadas por un observador calificado"; (*b*) "Realícense las operaciones necesarias para contrastar s"; y (*c*) "Actúese (analícese, mídase, constrúyase, destrúyase...) de conformidad con s". La referencia al objeto físico ha sido olvidada: todo apunta ahora a un sujeto activo. Consecuentemente, parece haberse descartado el ideal de la obje-

tividad científica.

Mientras que una interpretación pragmática estricta puede contribuir a determinar el significado de un símbolo, una interpretación adventicia, sea o no pragmática, deja de cumplir esta función; sólo prescribe o sugiere, de modo más o menos preciso, un modo de acción. No nos dice qué representan los símbolos sino lo que con ellos puede hacerse —que es aquello de lo único que interesa a los técnicos y filósofos wittgensteinianos. En segundo lugar, para que un signo *s* sea manejado de modo efectivo y conforme con una de sus interpretaciones pragmáticas, *s* no necesita tener pleno sentido para su utilizador prospectivo aun cuando deba tener algún sentido para la persona en última instancia responsable. Pero el programador debe ser consciente de la interpretación semántica de los símbolos que maneja, pues de lo contrario será incapaz de formular cualquier programa y descodificar el *output* de la máquina. Así, si una sentencia *s* expresa alguna propiedad *P* de un sistema físico, toda interpretación pragmática de *s* para el uso de, digamos, un equipo de medida automatizado, requiere no sólo una interpretación semántica adecuada de *s* (esto es, que apunte a sistemas físicos), sino también su vinculación con un número de sentencias adicionales capaces de expresar modos por los que *P* pueda efectivamente medirse en un sistema físico concreto. (Estas sentencias adicionales pertenecen usualmente a teorías distintas de la teoría en donde *s* forma parte.) En otras palabras, el diseño y ejecución de operaciones empíricas, sean o no automatizadas, implica la asignación de *interpretaciones pragmáticas basadas en interpretaciones semánticas*. En resumen, las interpretaciones adventicias, aun cuando legítimas, no pueden remplazar a las interpretaciones semánticas.

1.4. *Cuatro tesis relativas al referente de una teoría física*

Antes de preguntar por el referente de una teoría debemos preguntar si, en efecto, posee referente. Hay dos respuestas posibles a esta cuestión previa: "¿Poseen referente las teorías físicas?" Una es afirmativa, la otra negativa. La última es, en efecto, el punto de vista convencionalista o instrumentalista según el cual las teorías físicas no se refieren a nada sino que sólo son instrumentos para resumir y elabo-

rar datos, esto es, artefactos que nos permiten envasar informaciones y moler predicciones. Esta respuesta es insatisfactoria al menos por dos razones. Primero, no nos dice qué tipo de datos se supone manejan las teorías físicas y qué tipo de predicciones se supone producen a diferencia de, digamos, las teorías sociológicas. En segundo lugar, y por consiguiente, un convencionalista coherente no sabría cómo llegar a contrastar una teoría física, pues toda contrastación presupone conocer aquello respecto de lo cual se supone que se ocupa la teoría. En efecto, si una teoría se propone referirse a, digamos, los fluidos, entonces serán fluidos y no núcleos atómicos o guerras lo que tendrá que ser inspeccionado. Descartaremos, por consiguiente, la tesis convencionalista.

Un no convencionalista debería, pues, tener una respuesta a la cuestión: "¿De qué tratan las teorías físicas?" Dado que el referente de una teoría factual puede ser un objeto físico, o un sujeto, o alguna combinación de ambos, hay cuatro respuestas posibles y mutuamente incompatibles a la cuestión de la identidad del referente. Son:

(1) La tesis *realista*: una teoría física trata de sistemas físicos, esto es, se ocupa de entidades y acaecimientos que indudablemente poseen existencia autónoma (*realismo ingenuo*) o, si no, se presume (quizá erróneamente en algunos casos) que tienen existencia autónoma (*realismo crítico*). En resumen, la interpretación física de cualquier fórmula no formal en la física teórica debe ser a la par *estricta* (en cuanto opuesta a adventicia) y *objetiva* (en cuanto opuesta a subjetiva): todo enunciado teórico en la física es así un *enunciado de objeto físico*.

(2) La tesis *subjetivista*: una teoría física se refiere a sensaciones (*sensismo*) o, si no, a ideas (*idealismo subjetivo*) de algún sujeto comprometido en actos cognoscitivos —en cualquier caso, se refiere a estados mentales. En resumen, la interpretación física de cualquier fórmula en la física teórica debe ser a la par *estricta* y *subjetiva*: todo enunciado teórico en física es así un *enunciado de objeto mental*.

(3) La tesis *estricta de Copenhague*: una teoría física, o en todo caso la teoría cuántica, se ocupa de bloques inanalizables sujeto-objeto. Ninguna distinción absoluta (libre de sujeto, objetiva) puede obtenerse entre los dos componentes de un bloque tal: la frontera entre ellos puede cambiarse a voluntad. En resumen, la interpretación fi-

sica de cualquier fórmula no formal en la física teórica, o, al menos, en la teoría cuántica, debe ser a la par *adventicia* (en cuanto opuesta a estricta) y *físico-mental* (en cuanto distinta de física o mental) pues el observador y sus condiciones deben leerse en cada una de tales fórmulas aun si faltan las variables correspondientes: todo enunciado teórico en física es así un enunciado *físico-mental*.

(4) La tesis *dualista*: una teoría física se refiere a la vez a objetos físicos y actores humanos: concierne a las transacciones de los humanos con su entorno (*pragmatismo*) o a los modos con que los humanos manejan sistemas cuando intentan conocerlos (*operacionalismo*). En resumen, la interpretación física de cualquier fórmula en la física teórica, sea *estricta o adventicia*, debe ser *parcialmente objetiva, parcialmente pragmática*: todo enunciado en física es así un *enunciado parcialmente físico* y *parcialmente de objeto mental*.

La tesis realista es la que prevaleció durante el período clásico de la física, y fue defendida por Boltzmann, Planck, el último Einstein y de Broglie. La tesis subjetivista fue defendida frecuentemente por Mach (cuyos "elementos" o átomos eran sensaciones) y, ocasionalmente, también por Eddington y Schrödinger. La tesis de Copenhague fue propuesta por N. Bohr y defendida por sus seguidores fieles —estando aquí el calificativo en su puesto, pues la mayoría de quienes profesan su lealtad a la escuela de Copenhague oscilan en la actualidad entre (3) y (4). Y las tesis dualistas han sido expuestas de diversos modos por Peirce, Mach, Dingler, Dewey, Eddington, Bridgman, y Bohr, a la vez que por cientos de escritores sobre la relatividad (quienes identifican marcos de referencia con observadores) y cuantos (quienes toman a los aparatos por observadores). La cuarta tesis, es, en efecto, el núcleo de la filosofía oficial de la física (recuérdese el capítulo 1), aun cuando nunca haya sido vindicada mediante un cuidadoso análisis de las expresiones teóricas.

Las tres primeras tesis son *monistas* en el sentido de aseverar cada una de ellas que la clase de referencia de una teoría física es metafísicamente homogénea (física, mental, o físico-mental respectivamente) y sobre todo irreductible a entidades de tipo diferente. La cuarta tesis es *dualista* en el sentido de postular dos sustancias mutuamente irreductibles. Desde el punto de vista matemático, la clase de referencia de una teoría interpretada al estilo monista es homogé-

nea en el sentido de que se supone que todos los individuos o miembros de ese conjunto son del mismo género: bien sea físico, psíquico o psico-físico (véase sección 3.1). En cambio, la clase de referencia de una teoría moldeada según el estilo dualista será la suma lógica de dos o más conjuntos, uno de los cuales al menos representa un tipo de objeto físico mientras que al menos el otro conjunto representa a los observadores. (Véase, no obstante, la sección 3.3 en cuanto a la imposibilidad de llevar a efecto el programa dualista.) Así, v. g., el dominio de una función de probabilidad absoluta que figure en una teoría física se interpretará de las siguientes maneras por las distintas escuelas semánticas que se dan cita en la filosofía de la física: el conjunto de acaecimientos físicos de un tipo (realismo), el conjunto de acaecimientos mentales de un tipo (subjetivismo), el conjunto de fenómenos irracionales de cierto tipo (inanalizables e incomprensibles por tanto) (Copenhague), y el conjunto de pares observador-acaecimiento físico (dualismo).

Toda tesis monista expresa un compromiso con la hipótesis de que hay entidades de un cierto tipo: objetos físicos, mentes, o complejos psicofísicos, según el caso. El dualista, en cambio, mientras que alega que la física trata a la vez de cosas y actores, rehusará reconocer la existencia *independiente* de objetos físicos, y se acercará a la doctrina de Copenhague. Sustentará la tesis metodológica de que un enunciado que se refiera a una cosa es, en sí mismo, incontrastable. Y, basándose en la doctrina verificacionista del significado, tan de moda hace medio siglo, concluirá que semejante enunciado carece de significado. El pragmatista, pues, no es ni realista ni subjetivista: es, tal como Kant, un agnóstico. Y, al igual que el filósofo de Copenhague, el pragmatista sostiene que un enunciado teórico carece de sentido salvo que vaya acompañado por una descripción de las condiciones de su contrastación empírica. Mas, a diferencia del filósofo de Copenhague, el dualista distingue el sujeto del objeto y no ridiculiza el intento de analizar la interacción sujeto-objeto aun cuando pueda no cuidarse de realizarla él mismo. Más aún, el dualista no está dispuesto a reconocer la existencia de un tercer tipo de sustancia, compuesta en proporciones variables de objeto y sujeto.

De nada nos servirá, para descubrir cuál de las cuatro tesis filosóficas precedentes es la correcta, recurrir a citas de los Antiguos Maes-

tros, no sólo por carecer los argumentos de autoridad de valor sino también, porque como acabamos de ver, cada una de las tesis precedentes goza del apoyo de al menos un gran nombre. Peor: uno y el mismo autor puede endosar dos tesis mutuamente incompatibles en el mismo escrito sin advertir su diferencia. Así, Mach y Dewey oscilaron entre el subjetivismo y el dualismo; y Bohr, que empezó como realista, se convirtió en subjetivista (Bohr, 1934), osciló más tarde entre el dualismo (según viene representado a menudo por Heisenberg) y la estricta tesis de Copenhague (Bohr, 1958a) y parece haber vuelto finalmente al realismo (Bohr, 1958b). Tampoco nos servirán de mucha ayuda las discusiones filosóficas generales, pues el objeto de nuestra investigación es un tipo especial de conocimiento humano. Más bien, debemos tomar el toro por los cuernos y analizar teorías físicas y sus componentes (conceptos y enunciados). Procederemos al esbozo de semejante análisis con particular referencia a la teoría cuántica, pues, aunque el problema fuese anterior a esta teoría, con su nacimiento se agudizó.

2. La identificación del referente

2.1. *La dicotomía teórico-experimental*

Aunque las cuatro tesis expuestas en la sección última conciernen a la referencia de una teoría física, todas, salvo la primera, o tesis realista, se entiende que cubren la totalidad de la física, tanto la teórica como la experimental. En efecto, para el subjetivista consistente toda fórmula completa es una sentencia de objeto mental; para el filósofo de Copenhague toda expresión semejante concierne a un compuesto indisoluble mente-cuerpo; y para el dualista todo signo tal refiere a objetos y sujetos. En cambio, el realista alega que, mientras que un enunciado empírico (v. g., un dato experimental) se refiere tanto a un objeto físico cuanto a un observador (o equipo de observadores), un enunciado teórico deja de apuntar a cualquier sujeto, siendo incumbencia de la física teórica dar cuenta del mundo tal como es, independientemente de su ser percibido o manipulado. En resumen, de entre las cuatro, sólo la realista marca una diferencia semántica entre la fí-

sica teórica y la experimental.

Más aún, el realista apuntará probablemente que esta distinción le capacita para establecer la demarcación entre el significado de una fórmula y su contrastación —dos conceptos apenas distinguibles tanto para el filósofo de Copenhague cuanto para el dualista. Y puede agregar que esta distinción entre la física teórica y la experimental hace posible comprender por qué los teóricos trabajan sólo con su cabeza mientras que los experimentadores manosean piezas de instrumental. Finalmente, el realista puede también decir que la mismísima distinción es necesaria para comprender por qué las teorías no se autocontrastan (como debería ocurrir si el subjetivismo fuese verdadero) y por qué toda prueba empírica consiste en contrastar y evaluar predicciones teóricas, de un lado, con resultados experimentales, de otro. En todo caso, cualquiera sea nuestra actitud final ante el realismo, deberíamos darle una oportunidad de defensa, aceptando establecer la distinción teórico-experimental aun si es propósito nuestro terminar negando que haya alguna.

Ahora bien, las teorías son ciertos conjuntos de proposiciones —a saber, conjuntos infinitos cerrados respecto de la deducción— y todo enunciado físico contiene por lo menos un concepto físico: de lo contrario no contaría como enunciado físico. Por consiguiente, nuestro análisis semántico de las teorías físicas debe comenzar con conceptos físicos. Puede también terminar con ellos, pues este nivel de análisis es necesario y suficiente para revelar el referente de una teoría física: una teoría se refiere a todos y sólo aquellos ítems a los que refieren los conceptos con los que se construye la teoría. Estando fuera de cuestión en el presente contexto una investigación de este tipo, restringiremos nuestra atención a unos cuantos ejemplos típicos.

2.2. *El referente de una cantidad física*

Las llamadas cantidades físicas (o, más bien, magnitudes) se dice que "pertenecen" a un sistema físico de algún tipo o que están "asociadas" con un objeto tal. Esta asociación símbolo-cosa se hace obvia cuando es necesario nombrar los componentes de un sistema complejo, v. g., asignándoles numerales. Así, la *P*-idad del e*n*ésimo compo-

nente de un sistema puede designarse por P_n.

Estas vagas frases pueden ser elucidadas introduciendo dos conceptos semánticos básicos: los de referente y representación. En efecto, lo que se significa diciendo que P "pertenece a" o "está asociado con" un sistema físico de un cierto tipo, es esto: el concepto (función) P representa una propiedad física (llámesela $\mathscr{P}$) de un sistema arbitrario σ de un cierto tipo, llamémosle Σ. Por tanto, Σ es la *clase de referencia* (supuesta) de P. (En un momento, generalizaremos esto al caso de los referentes múltiples.) La mención explícita del referente es una advertencia de que, a diferencia de las funciones en las matemáticas puras, las de la física teórica pueden incumbir a sistemas físicos actuales. Y la mención explícita de la representación de una propiedad $\mathscr{P}$ por un concepto P requiere nuestra atención en cuanto a la posibilidad de que una y la misma propiedad (v. g., la carga eléctrica) pueda representarse por conceptos diversos en teorías diferentes. En resumen: P *se refiere* a Σ *y representa* a $\mathscr{P}$. Todo esto se aclarará y ejemplificará en seguida.

Sea P una función que representa la propiedad $\mathscr{P}$, o, brevemente, $P \triangleq \mathscr{P}$. Ahora bien, una función no está bien definida salvo que se den su dominio y rango. En el caso más simple, el de una propiedad cuantitativa invariante, la función en cuestión se "definirá" sobre un conjunto de elementos interpretados como sistemas físicos, y tomará valores en algún conjunto de números. El dominio de esta función será o un conjunto de sistemas individuales (como en el caso de la carga) o un conjunto de pares (como en el caso de una interacción) o, en general, de n-tuplos de sistemas físicos. Estos conjuntos son, desde luego, las clases de referencia del concepto P.

Ejemplo 1. En la electrodinámica clásica, la carga eléctrica se representa mediante una función Q del conjunto Σ de sistemas materiales al conjunto R^+ de números reales no negativos, esto es, $Q: \Sigma \to R^+$. De hecho, una "variable independiente" adicional figura en Q, a saber, el sistema s escala *cum* unidad, que usualmente viene especificado por el contexto de la fórmula en que figura Q. Por tanto, un análisis correcto de la función de carga eléctrica es:

(1) $\quad Q: \Sigma \times S \to R^+$

donde S es el conjunto de todos los sistemas escala *cum* unidad con-

cebibles. Por ejemplo, para Σ = electrones y s = unidades electrostáticas en una escala métrica uniforme (para una explicación de una escala física, véase Bunge, 1967c) se tiene con el enunciado legal (usualmente tácito):

(2) Para todo σ en $\Sigma: Q(\sigma, \text{esu}) = e \simeq 4.802 \times 10^{-10}$.

En todo caso, la clase de referencia de Q es el conjunto Σ de cuerpos.

Ejemplo 2. En todas las teorías físicas, la posición (o si no la densidad de posición) de un punto de un sistema físico, sea cuerpo o campo, sistema clásico o cuántico, viene representada por una función vectorial X del sistema elemental, el marco de referencia, y el tiempo. En resumen, presuponiendo una vez más una escala métrica uniforme,

(3) $X: \Sigma \times F \times T \to R^3$

donde F es el conjunto de marcos físicos y T el conjunto de instantes. Puesto que T no es una cosa, la clase de referencia de X es sólo $\Sigma \cup F$. Esto es lo que significa la descripción determinada "la posición de σ relativa al marco f".

Ejemplo 3. La sección eficaz de dispersión de una partícula de tipo A que choca elásticamente con una partícula de tipo B con momento ondulatorio k relativo al marco f (v. g., el del sistema del centro de masa), es una función σ (adviértase el cambio de notación) del conjunto de cuádruplos $\langle a, b, f, k \rangle$, donde $a \in A$, $b \in B$, $f \in F$ y $k \in K$, a la línea real positiva. En resumen,

(4) $\sigma: A \times B \times F \times K \to R^+$,

donde K es el rango del momento. Por ejemplo, para A=protones, B=neutrones, y f=marco del centro de masa, tenemos, en primera aproximación, la conocida fórmula cuántica

(5) $\sigma_{PN}^{cm}(k) = 4\pi/k^2$.

Se ha presupuesto el sistema CGS. En todo caso, la clase de referencia de σ es $A \cup B \cup F$.

Nuestro análisis semántico favorece hasta aquí una interpretación monista: en efecto, la clase de referencia de una magnitud física pare-

ce ser o un conjunto de sistemas o la unión de conjuntos de sistemas. El observador no está a la vista. Más aún, nuestro análisis refuta la doctrina de Copenhague, en la medida en que no se han detectado huellas de la unidad sellada sujeto-objeto. Sólo dos opiniones son apoyadas por nuestro análisis: el realismo y el subjetivismo (véase sección 2.2). La elección entre las dos no puede hacerse solamente sobre la base de nuestro análisis, pues el subjetivista no encontrará dificultad en identificar todo sistema que denominemos "físico" como objeto mental.

Sólo un análisis de la totalidad de las actividades científicas inclina la balanza a favor del realismo (Bunge, 1967c). Basten aquí las razones siguientes. (*a*) Todo investigador comienza admitiendo su ignorancia de algo que presume, bien que sólo provisionalmente, que existe por sí mismo y esperando, a que sea descubierto. (*b*) Toda teoría adecuadamente formulada parte suponiendo que la clase de referencia de que se ocupa es no vacía, pues de lo contrario la teoría sería vacuamente verdadera. Pero esto es nada menos que un compromiso (crítico) con la hipótesis de que la teoría tiene referentes reales. (*c*) Independientemente de las fantasías que imagina el subjetivista cuando escribe artículos de popularización, el experimentador está obligado a tomar una actitud realista hacia sus montajes experimentales, los objetos de sus investigaciones, e, incluso, hacia sus colegas.

Pero, como se mencionó antes, el concepto de observador, aun cuando ausente de la física teórica, interviene en la física experimental. Así, en lugar de la fórmula libre de observador (2), en la física experimental encontramos enunciados como éste: "El valor (en esu) de la carga e del electrón, según la mide el grupo experimental g con la técnica t y el instrumento complejo i, vale $(4.802 \pm 0.001) \times 10^{-10}$". En resumen, en lugar de (2) tenemos ahora

(2′) Para todo σ en Σ examinado por g: $Q'(\sigma; \text{esu}, g, t, i) = (4.802 \pm 0.001) \times 10^{-10}$,

donde Q' designa la función cuyos valores son valores medidos de la carga eléctrica. Nótese que Q' difiere de Q (el concepto teórico) no sólo numéricamente sino también estructuralmente: es un *concepto diferente* por completo. De hecho, mientras que Q es una función del conjunto $\Sigma \times Q$, Q' es "definido" en el conjunto $\Sigma \times S \times G \times T \times I$, don-

de G es el conjunto de grupos experimentales, T el conjunto de técnicas de medidas de cargas, e I el conjunto de equipos de medida de cargas. De hecho, una sexta "variable independiente" está implicada en el concepto experimental de carga eléctrica, a saber, la secuencia o de operaciones por las que se implementa una determinada técnica t por un grupo g con la ayuda del complejo instrumental i. Que o no es una variable huera o vacía (en el sentido de la sección 1.2), se muestra por el hecho de que cambiar su valor usualmente provoca una diferencia en el resultado numérico. Denominando O al conjunto de todas estas secuencias operativas, tenemos finalmente, en contraste con (1),

$$(1') \qquad Q' : \Sigma \times S \times G \times T \times I \times O \rightarrow \mathscr{P}(\mathrm{R}^{+}),$$

donde $\mathscr{P}$ (R^{+}) es el conjunto de todos los intervalos de R^{+}.

Vemos justificado ahora sacar una conclusión general del análisis precedente: *Mientras que las fórmulas teóricas son libres de observador, las fórmulas experimentales son dependientes del observador*. Mas precisamente: mientras que cualquier interpretación estricta de una fórmula teórica es *objetiva* (esto es, está hecha solamente en términos de conceptos físicos), la física experimental requiere una *reinterpretación pragmática* de la misma fórmula. Semejante interpretación pragmática, aunque adventicia (pero posiblemente válida) si dependiente de una fórmula teórica, es una interpretación estricta en un contexto experimental, esto es, es validada sustituyendo una fórmula teórica (tal como (1)) por su colega teóricos (tal como (1')).

Tanto las interpretaciones de Copenhague como la dualista de las teorías físicas surgen de una confusión entre los conceptos teóricos y los experimentales, aun si los últimos se apoyan en los primeros y son más complejos que sus bases teóricas. (En particular, una función teórica puede considerarse como la proyección de la correspondiente función de valor medido respecto de un cierto conjunto. Así Q en (1) es la proyección de Q' sobre $\Sigma \times S$.) No puede deplorar esta confusión el filósofo de Copenhague, para quien todo es, en su origen, incurablemente irracional, pero destruye el verdadero fin del dualista, que es evitar platonizar. En efecto, si a toda fórmula teórica se asigna una interpretación pragmática, entonces se hace imposible contrastar la teoría con el experimento con el fin de poner a prueba aquélla y diseñar éste. Es más, dado que la mayoría de las interpretaciones son ad-

venticias, la arbitrariedad propende a instalarse: cualquiera se sentirá autorizado a leer en toda fórmula lo que le plazca, independientemente de la estructura de la fórmula: la semántica carecerá de apoyo sintáctico. Las interpretaciones realista y subjetivista están libres de estas fallas. Si por las razones indicadas hace un rato rechazamos el subjetivismo, sólo el realismo continúa en pie. Deberíamos adoptar entonces una interpretación estricta y objetiva de cualquier fórmula teórica. Veamos cómo funciona este enfoque en la teoría cuántica, de la que se dice que es la sepultura del realismo (y la causalidad).

2.3. *El vector de estado*

Se admite generalmente que el vector de estado o función de onda ψ es una amplitud de probabilidad (esto es, que el cuadrado de su módulo es una densidad de probabilidad). Más aún, esta, que es la interpretación "estadística" (de hecho probabilista o estocástica) de ψ de Max Born, puede probarse a partir de un cierto conjunto de postulados, por lo que está lejos de ser *ad hoc*, de ahí que sea ineludible si se mantiene el formalismo standard de la mecánica cuántica (Bunge, 1967a, pp. 252 y 262). Por otra parte, no existe consenso en cuanto a lo que ψ es en cuanto amplitud de probabilidad. En ocasiones, se considera que ψ se refiere a un sistema individual, en otras a un conjunto estadístico (actual o potencial) de sistemas similares. Otras veces se arguye que ψ mide nuestra información o nuestro grado de certeza concerniente al estado de un complejo aparato-microsistema, o, finalmente, que resume una serie de medidas sobre un conjunto de microsistemas preparados idénticamente. (Para una revisión crítica de diferentes interpretaciones del vector de estado, véase Bunge, 1956 y 1959b.) En cualquier caso es habitual asignar a ψ alguna de tales interpretaciones sin cuidarse de si se adecua a la estructura ψ y sin asegurarse de si la interpretación contribuye a la coherencia y la verdad de la teoría.

Con todo, es posible evitar la arbitrariedad inherente a las interpretaciones adventicias de ψ y sacar a luz sus referentes genuinos. La clave reside, desde luego, en el operador hamiltoniano H ya que, según la ley central de la mecánica cuántica (la ecuación de Schrödinger

o su equivalente, H es lo que "impulsa" a ψ a lo largo del tiempo. Ahora bien, H no está dado desde arriba sino que es lo que nosotros queremos que represente: el estado de un átomo de carbono, una molécula de DNA, o lo que sea —y ello en cualquier teoría hamiltoniana, sea clásica o cuántica. Debemos, pues, partir enunciando nuestras hipótesis acerca de aquello a lo que H, por tanto ψ, refiere. Algunas de tales presunciones resultarán ser (aproximadamente) verdaderas, otras falsas: tal es la vida de las teorías.

Consideremos el más simple matemáticamente (pero semánticamente más complejo) de los casos: la mecánica cuántica de una "partícula" (o más bien del cuantón individual). Si el formalismo resulta ser verdadero bajo una cierta interpretación de los símbolos básicos (primitivos), entonces la totalidad, formalismo más semántica, se juzgará verdadera de tales sistemas individuales aun si su contrastación empírica requiere la intervención de seres sensibles que manipulen (directamente o por delegación) grandes colecciones de microsistemas. En esta teoría, H, por lo tanto también ψ, depende del tiempo y de dos conjuntos de variables dinámicas: aquellas que conciernen al microsistema de interés (v. g., un átomo de plata) y aquellas que conciernen al entorno del sistema (v. g., un campo magnético). Si se supone que ningún macrosistema tal actúa sobre un determinado microsistema, esto es, si se supone que este último es libre, entonces no figurarán macrovariables en el hamiltoniano (ni, consecuentemente, en el vector de estado), sin importar toda la charla *ad hoc* sobre observadores y dispositivos de medida. En efecto, es totalmente arbitrario, asunto por tanto de ciega creencia, alegar que aun si un determinado hamiltoniano no contiene macrovariables, concierne de hecho a una mente observadora, o a un compuesto mente-cuerpo, o incluso a un complejo aparato-microsistema. Toda interpretación tal, al violar la sintaxis de H y ψ, es adventicia: implica variables fútiles: tiene una cualidad fantasmagórica. Tanto el formalismo de la mecánica cuántica (no relativista elemental) y el conjunto de sus aplicaciones (v. g., a moléculas) garantizan sólo este análisis de cualquier vector de estado:

(6) $$\psi : \Sigma \times \bar{\Sigma} \times E^3 \times T \rightarrow C$$

donde Σ es el conjunto de microsistemas, $\bar{\Sigma}$ el conjunto de macrosistemas, E^3 el espacio euclídeo ordinario, T el rango de la función tem-

poral, y C el plano complejo. Consiguientemente, la clase de referencia de esta teoría es $\Sigma \cup \Sigma'$, esto es, la unión de microsistemas y sus entornos. Cualquier otra interpretación carece de fundamento: carece de pie donde apoyarse salvo los *dicta* de algún científico famosos y sus apologistas filosóficos. (Para una rica colección de citas en apoyo de la interpretación de Copenhague y un retorno a las ideas de Bohr, véase Feyerabend, 1968. Para críticas, véase Hooker, 1972.)

2.4. *Probabilidad*

De todas las interpretaciones del vector de estado, la subjetivista o casi subjetivista es la más elástica, así que valdrá la pena que la consideremos con algún detalle. Un argumento popular en favor de la tesis de que debe ser subjetivista o al menos parcialmenta así, es la siguiente: "El vector de estado posee sólo un significado probabilista [*verdadera*]. Ahora bien, las probabilidades conciernen sólo a estados mentales: una probabilidad puede medir sólo la intensidad de nuestra creencia o la exactitud de nuestra información [*falsa*]. Por tanto, el vector de estado concierne a nuestras mentes más bien que a sistemas físicos autónomos [*falsa*]." Este argumento es válido pero su conclusión es falsa porque su segunda premisa es errónea: en efecto, es tarea de las teorías estocásticas en física computar probabilidades físicas (v. g., probabilidades de transición y secciones de choque) y propiedades estadísticas (promedios, dispersiones medias, etc.) de sistemas físicos, no de acaecimientos mentales. En todo caso, es sorprendente que los mismos científicos que han adoptado a menudo, o aún consistentemente, una interpretación subjetivista de la probabilidad, tales como Bohr, Born, Heisenberg, y von Neumann, hayan creído al mismo tiempo haber superado el determinismo clásico, uno de cuyos ingredientes esenciales es la tesis de que la probabilidad no es sino un nombre de la ignorancia. Parecería que desde que nacieron la física estadística y la biología estadística, hemos reconocido la aleatoriedad como modo de devenir, al principio, sólo de agregados, ahora, también de entidades individuales. En cualquier caso, la interpretación subjetiva de la probabilidad no tiene cabida en la física y presupone el determinismo clásico.

El que las probabilidades hayan o no de ser interpretadas como propiedades físicas en un pie de igualdad con longitudes y densidades, no es materia opinable sino cuestión de análisis matemático y semántico. Sólo un examen de la(s) variable(s) independiente(s) de una función de probabilidad nos dirá si cabe asignar a la función una interpretación (estricta) en cuanto propiedad física, en cuanto estado mental, o en cuanto que "pertenece" (se refiere a) a algún complejo cosa-mente. Pero aunque semejante análisis indique las posibilidades de interpretación no bastará para descubrir si alguna de ellas es admisible. Tal acaecerá sólo si el cálculo de probabilidades o, más bien, el formalismo entero que incluye ese cálculo, se hace verdadero bajo la interpretación dada. Y, de nuevo, ello no es cuestión de gusto o escuela filosófica, ni decisión arbitraria, sino más bien cuestión a ser establecida mediante el análisis y el experimento.

Tomemos, por ejemplo, la expresión "$Pr\ (x) = r$", donde "Pr" representa la función de probabilidad y r un miembro del intervalo de números reales (0,1). Si x nombra a un objeto físico, tal como un estado o cambio de estado, entonces $Pr\ (x)$ será una propiedad de ese objeto, y cualquier referencia a observadores, sus operaciones, o sus estados mentales, será gratuita. Sólo si x simboliza un acontecimiento psíquico representará "$Pr\ (x)$" algo mental. No hay sitio para dos referentes, v. g., un objeto físico y un objeto psíquico, allí donde hay una sola variable independiente. Las probabilidades absolutas (incondicionales) son entonces inexpugnables a interpretaciones pragmáticas estrictas en términos a la vez de objetos físicos y actores: para amarrarlas a un sujeto necesitamos una variable adicional. Esta posibilidad viene proporcionada por las probabilidades condicionales.

La expresión "$Pr\ (x \mid y) = r$", leída como "la probabilidad de x dado y vale r", podría interpretarse en cualquier sentido, objetivista, subjetivista, o, finalmente, dualista (a saber, como concerniente a una pareja cosa-sujeto). Por ejemplo, si el contexto, o, aun mejor, las reglas y suposiciones explícitas, indican que x denota un objeto físico (v. g., un estado o acaecimiento) e y un observador, entonces "$Pr\ (x \mid y)$" podría leerse como la probabilidad de que el acaecimiento físico x acaezca supuesto que el observador y esté presente, o dado que el acaecimiento mental y ha ocurrido, o de alguna otra manera dualista. Pero, según se observó anteriormente, cualquier interpretación así se-

rá legítima sólo en el caso de que (*a*) la teoría contenga variables independientes y a la par las especifique, y (*b*) los teoremas de probabilidad condicional se satisfagan bajo esta interpretación, esto es, sean satisfactoriamente confirmados por la observación. En realidad, hay una tercera condición a satisfacer, a saber, la de relevancia: uno puede siempre agregar una variable de observador, pero salvo que esta variable produzca una diferencia y sus propiedades sean especificadas por la teoría, será una variable huera. Basta, pues, con la interpretación estricta de las probabilidades.

Siempre es posible proponer una interpretación pragmática, incluso para probabilidades incondicionales (o absolutas) y a menudo es necesaria, pero nunca es estricta, esto es, no "fluye" de las fórmulas sino que debe sobreimponerse a ellas en un sentido que rebasa a la teoría física. Lo que quiero decir es lo siguiente. Con seguridad, alguien habrá de confrontar algunas probabilidades, sea teórica, sea empíricamente, o bien de ambas maneras, de suerte que resulten enunciados del siguiente tipo: "El valor r de la probabilidad del acaecimiento x fue comprobado por el observador y con los medios z". Pero este enunciado no pertenece a la teoría: no la autoriza como interpretación estricta de la fórmula "$Pr\ (x) = r$". Algo parecido vale para toda propiedad física, no sólo para probabilidades. Así, el enunciado físico: "La distancia entre los puntos extremos x e y del cuerpo z, según la mide el observador u con los medios v, vale $r \pm \varepsilon$". En resumen, dado un enunciado teórico con una interpretación física estricta, cabe vincularle cualquier número de interpretaciones pragmáticas adventicias. Pero ninguno de los enunciados pragmáticos resultantes pertenece a la teoría, así como ninguno de los parásitos de un árbol forma parte del árbol. La argumentación operacionalista popular de que sólo los enunciados pragmáticos son significativos, de modo que las asignaciones de significado requieren una referencia a operaciones empíricas, descansa sobre una confusión entre significado y verificación, confusión que hace tiempo fue aclarada por los filósofos. (Cf. Bunge, 1974a y 1974b.)

2.5. *Interpretación y estimación de probabilidades*

Suele sostenerse que lo que queremos en ciencia es la interpretación frecuentista de la probabilidad, esto es, la interpretación de las probabilidades como frecuencias relativas. Pero esto no es ciertamente así. En efecto, al leer probabilidades en términos de frecuencias relativas, no realizamos una *interpretación* estricta sino más bien una valoración o *estimación* (estadística). Esto es, no aseveramos que las probabilidades *signifiquen* frecuencias sino que, en ocasiones, pueden ser *medidas* por frecuencias. En este respecto, una probabilidad no difiere de cualquier otra cantidad física: es un constructo, cuyo valor numérico ha de ser contrastado con un valor medido. Más aún, así como no hay una sola técnica de medición para cualquier determinada magnitud física, tampoco hay una única manera de estimar probabilidades a partir de datos estadísticos: en ocasiones se cuentan frecuencias, en otras, se miden entropías, en algunas, se miden intensidades de líneas espectrales, a veces secciones eficaces de dispersión y así sucesivamente. La misma teoría en la que se incrusta el concepto de probabilidad puede (pero usualmente no lo hace) sugerir modos de estimar probabilidades. En la mayoría de los casos, son necesarias teorías adicionales para estimar probabilidades a partir de datos empíricos. Pero esto no es propio de la probabilidad: vale también para otras propiedades. (Véase el capítulo 10.)

Hay cinco razones adicionales para rechazar no sólo las teorías frecuentistas de la probabilidad (como la de von Mises y Reichenbach), que son, en cualquier caso matemáticamente insostenibles, sino también la *interpretación* frecuentista de la probabilidad. En primer lugar, lo que parece que se da a entender por "$Pr(x) = r$" es, en física, algo como la intensidad (medida por el número r) de la tendencia o propensión para que x ocurra, dejando de lado por completo el número de veces que (actual o potencialmente) se observa que acaece. La última cuenta servirá para contrastar una fórmula probabilista más bien que para asignarle significado. En segundo lugar, mientras que las probabilidades pueden ser propiedades de individuos (v. g., acaecimientos), las frecuencias relativas son propiedades colectivas, esto es, propiedades de conjuntos estadísticos. En tercer lugar, las fórmulas

de la teoría de la probabilidad no son satisfechas exactamente por frecuencias, ni siquiera a largo plazo, que es siempre un plazo finito. Sólo la *probabilidad* de cualquier divergencia dada de una frecuencia respecto de la probabilidad correspondiente decrece con el aumento del tamaño de la muestra. Pero este teorema rige sólo para un tipo especial de procesos aleatorios, a saber, una secuencia de pruebas de Bernouilli. Es más, la probabilidad de segundo orden de que habla el teorema no es en sí misma reductible a una frecuencia.

En cuarto lugar, probabilidad y frecuencia *no son la misma función* pues mientras la primera se define (sea absoluta o condicional) sobre un cierto conjunto E, la frecuencia se define, para todo procedimiento s de muestreo, sobre un subconjunto finito E^* de E. (En pocas palabras, $Pr: E \rightarrow [0,1]$, mientras $f: E^* \times S \rightarrow F$, donde S es el conjunto de procedimientos de muestreo y F la colección de fracciones en el intervalo unitario.) Por tanto, no es verdad que se obtenga un modelo o interpretación verdadera del cálculo de probabilidades al interpretar las probabilidades como frecuencias relativas observadas; a lo más, podríamos decir que lo que así obtenemos es un *cuasi-modelo*. En quinto lugar, si una teoría estocástica (tal como la mecánica estadística, la mecánica cuántica, la genética, o algún modelo estocástico de aprendizaje) se interpreta en términos de frecuencias, entonces no tiene objeto realizar mediciones para comprobar las fórmulas teóricas. (Asimismo, con todos los conceptos físicos restantes, por ejemplo, con el de valor propio de un operador representativo de una propiedad física: si los valores propios se interpretaran como valores medidos, al modo en que la propugna la escuela ortodoxa, entonces carecería de objeto llevar a cabo mediciones reales.) Lo que hace indispensables tanto la teoría como el experimento es que ambos son radicalmente diferentes: una teoría no es un resumen de experimentos, y ninguna serie de experimentos remplaza una teoría. Se necesitan ambos para engendrar un nuevo item de conocimiento.

En resumen, ni la interpretación subjetivista ni la dualista de la probabilidad tienen cabida en la física teórica: las que tienen cabida en ella son las siguientes interpretaciones estricta y objetivista: la interpretación de la *propensión* (Popper, 1959) y la interpretación de la *aleatoriedad*. Según la primera, una probabilidad es una media de la intensidad de la tendencia para que algo suceda: la probabilidad es

sólo potencialidad cuantificada, con referencia a sistemas físicos, sean simples o complejos, libres o bajo la acción de otros sistemas, y, en particular, tanto si están bajo observación como si no. (Ésta es, en rigor, mi propia versión de la interpretación de la propensión, según se encuentra en Bunge (1967c). La versión de Popper (*ibid.*) concierne al compuesto objeto-dispositivo experimental y podría, por consiguiente, ser errónea al apoyar la tesis de Bohr de la inextricable unidad de los dos —como de hecho ha interpretado Feyerabend (1968). En una comunicación personal, Sir Karl ha indicado su acuerdo con mi reinterpretación. Véase la discusión de Settle (1974).) Según la segunda interpretación, la probabilidad es la chance o peso de un acaecimiento perteneciente a una colección aleatoria (v. g., una secuencia de Markov) de acaecimientos.

En cualquiera de estas interpretaciones, la probabilidad de un acaecimiento es una propiedad objetiva del mismo: es inherente a las cosas; asimismo, una distribución de probabilidad se interpreta como propiedad objetiva (pero potencial más bien que actual) de un sistema físico. La diferencia entre las interpretaciones de la propensión y la aleatoriedad es que la primera es más amplia, pues no requiere que los acaecimientos sean aleatorios, mientras que la interpretación de la aleatoriedad vale sólo para acaecimientos aleatorios y, por consiguiente, exige criterios que le permitan a uno descubrir si el conjunto determinado de acaecimientos es aleatorio. En otras palabras, la interpretación de la aleatoriedad de la probabilidad puede ser considerada como la restricción de la propensión al subconjunto de acaecimientos aleatorios. En cualquier interpretación, la probabilidad de, digamos, una transición de un estado de un sistema a otro estado es tan objetiva como la velocidad de la transición: en modo alguno tiene que ver con la ignorancia, o la incertidumbre, o, inversamente, la intensidad de nuestras creencias (que por lo usual son, en cualquier caso, demasiado fuertes). Llamaremos a ambas interpretaciones con el nombre de *probabilidad física*.

Sospéchese o no del concepto de propensión, debe uno considerar las probabilidades que figuran en la física ciertamente como propiedades físicas en un pie de igualdad con la tensión interna o la intensidad del campo eléctrico. La razón es ésta: todas las variables independientes de una función de probabilidad representan en una teoría física sis-

temas físicos o propiedades suyas. (Incluso el tiempo, la menos tangible de todas las variables físicas, puede elucidarse en términos de acaecimientos y marcos de referencia: Bunge, 1968d.) No hay modo de pasar de contrabando al observador y a su mente en un enunciado probabilista teórico arguyendo, por ejemplo, que la mecánica cuántica no concierne a sistemas autónomos sino más bien a un complejo constituido por un microsistema, un dispositivo experimental (¿cuál, por favor?), y su operador. En primer lugar, porque esto es sencillamente erróneo: la mayoría de las fórmulas cuánticas se refieren a microsistemas incrustados en un medio puramente físico (que muy frecuentemente está ausente). Esto no es asunto para pronunciamientos *ex cathedra* sino asunto de análisis de las fórmulas de que nos ocupamos, y este análisis no será exhaustivo a menos que las fórmulas se formulen explícitamente, esto es, a la manera axiomática, tan desagradable para los enemigos de la claridad. Una segunda razón es que ni siquiera aquellas fórmulas que conciernen a un complejo objeto-entorno (v. g., una molécula inmersa en un campo eléctrico), se refieren a un observador en cuanto tal, esto es, a un ser psico-físico. Pues, de ser así, la teoría cuántica debería permitirnos predecir no sólo el comportamiento de los microsistemas sino también la conducta del observador, lo que desafortunadamente no hace. En conclusión, no hay base para aseverar que el sujeto cognoscente interviene en la física teórica, en particular la teoría cuántica, vía la probabilidad y el vector de estado. Y, si no hace uso de estas puertas, es difícil ver de qué otro modo podría entrar allí.

3. Distinguiendo el aparato observador

3.1. *Enfoques de la Teoría de la Medición*

Muchos autores describen una medición como una interacción entre un objeto y un observador, o, incluso, como una síntesis de los dos. Pero mientras algunos escritores entienden por "observador" un sujeto cognoscente con su equipo psíquico íntegro, otros entienden un aparato descriptible clásicamente, y aun otros prefieren guardar silencio. Si no se hace diferencia entre un observador y su equipo, y si

se otorga al observador una mente suprafísica (v. g., un alma inmortal), entonces la medición se convierte en la puerta por la que pasan el alma y el espíritu no sólo a la elaboración de la física, sino también a las cosas mismas, que, por tal razón, dejan de ser cosas en sí. En efecto, un argumento standard contra el realismo proviene de la naturaleza de la medición microfísica. Debemos, consiguientemente, echar una ojeada a su teoría, o, mejor, a los diversos programas para establecer una teoría de la medición, pues son varios y ninguno ha llegado a cumplirse. Debemos hacerlo no sólo en interés de la epistemología, sino también en el de los físicos experimentales, pues si éstos no se distinguieran de sus equipos, entonces o no habría que pagarles salarios o no habría que concederles fondos para la compra y mantenimiento de dispositivos experimentales.

Esencialmente, se encuentran en la literatura los siguientes enfoques de la teoría de la medición en relación con la teoría cuántica.

(1) *Realismo ingenuo*: (*a*) las mediciones básicas son directas, esto es, no necesitan de teorías; (*b*) puede describirse las mediciones derivadas o indirectas por medio de las teorías físicas disponibles suplementadas con la estadística matemática; (*c*) en definitiva, no se requieren teorías especiales de la medición. *Crítica*: véase el siguiente punto.

(2) *Realismo crítico*: (*a*) no hay mediciones de precisión directas, particularmente en la microfísica; (*b*) cualquier teoría detallada de la medición de una magnitud física (v. g., el cálculo del tiempo) o de la preparación de un sistema físico (v. g., un haz de protones con una determinada distribución de velocidad) requiere diversas teorías generales a la par que un modelo determinado del equipo experimental (v. g., una teoría del ciclotrón es una aplicación de la electrodinámica clásica o, si se prefiere, es una pieza de tecnología relativista); (*c*) dado que las mediciones son específicas e implican sistemas macrofísicos, las teorías genuinas de la medición (a diferencia de las hueras, encontradas en algunos libros de mecánica cuántica) no pueden dejar de ser específicas e implican fragmentos de teorías clásicas (v. g., la mecánica clásica y la óptica); (*d*) no hay ninguna teoría *general* adecuada de la medición, sea en la física clásica o en la cuántica, y, más aún, es dudoso que pueda desarrollarse alguna, precisamente por no haber mediciones generales y porque todo acaecimiento macrofísico cruza

diversas fronteras entre los varios capítulos de la física. Tal es, desde luego, la tesis del presente libro.

(3) *Operacionalismo ingenuo* (filosofía de manual): (*a*) toda teoría física, en particular, la mecánica cuántica, concierne a operaciones de medición actuales o posibles y sus resultados; así, un operador hamiltoniano representa una medición de la energía y sus valores propios son valores mensurables de energía; (*b*) consecuentemente, no hay necesidad de una teoría especial de la medida.

Crítica: (i) hay una diferencia a la vez estructural y semántica entre una magnitud teórica y su socio experimental, si lo tiene (recordemos la sección 2.2); (ii) si las teorías generales conciernen a observaciones empíricas, entonces una de las dos —teorías u observaciones— serían redundantes y la elección el equipo no supondría diferencia.

(4) *Operacionalismo radical* (Ludwig, 1967): (*a*) las medidas básicas son directas; (*b*) una teoría básica, tal como la mecánica cuántica, debería ocuparse de medidas básicas y derivarse de un análisis de la física de la medición.

Crítica: (i) no hay mediciones directas, al menos, no de microsistemas (véase la anterior crítica del realismo ingenuo); (ii) los análisis científicos, sean de conceptos u operaciones, lejos de ser extrasistemáticos, se llevan a cabo con la ayuda de teorías; (iii) en particular, un análisis de una medición presupone diversas teorías a la par substantivas (v. g., la teoría electromagnética) y metodológicas (particularmente, la estadística matemática).

(5) *Versión estricta de Copenhague* (Bohr, 1958a): (*a*) un proceso de medición es aquel en que objeto, aparato, y observador quedan fundidos en un bloque sólido, de suerte que pierden sus identidades; (*b*) esta unidad es peculiar al fenómeno cuántico, que es así inanalizable; (*c*) "El formalismo mecánico-cuántico permite aplicaciones bien definidas que se refieren sólo a tales fenómenos cerrados" (Bohr, 1958a, p. 73); (*d*) una teoría de la medición trataría de analizar semejante unidad, distinguiendo entre sujeto y objeto y descubriendo la forma precisa de su interacción, destruyendo así la irreductibilidad e irracionalidad que caracteriza los fenómenos cuánticos; (*e*) consiguientemente, no debería llevarse a cabo ningún intento de construir una teoría cuántica de la medición (Rosenfeld, 1964).

Crítica: (i) si bien un acto de medición implica a un observador

(y muchas otras cosas también), la física no trata de seres sensibles sino de sistemas físicos, en ocasiones bajo control pero la mayoría de las veces libres y, en todo caso, vacíos de componentes mentales; (ii) sería deseable disponer de varias genuinas teorías cuánticas detalladas de procesos de medición real (por tanto específica), teorías capaces de explicar y predecir la cadena que parte de un acaecimiento elemental (v. g., una reacción fotoquímica) y termina en un macroevento observable (v. g., el ennegrecimiento de una placa fotográfica): desear lo contrario es puro oscurantismo.

(6) *Versión de Von Neumann* (von Neumann, 1932, 1955): (*a*) un proceso de medición es una interacción objeto-sujeto caracterizada por la arbitrariedad de la frontera entre los dos (esto es, puede realizarse, con propósitos de análisis, un corte pero su posición es convencional); (*b*) más que ser una aplicación de la mecánica cuántica y otras teorías físicas, una teoría cuántica de la medición requiere suspender el principal postulado de ésta (la ecuación de Schrödinger o su equivalente), adoptando en su sitio el postulado de proyección, según el cual la medición de un observable arroja el vector de estado sobre cualquiera de los vectores propios del observable en cuestión; (*c*) la teoría de la medición que resulta es enteramente general y sobre todo otorga a la mecánica cuántica su significado operacional. Dado que esta versión se supone que es la versión standard, concentraremos nuestra atención en ella.

3.2. *La descripción standard de la medición*

La versión usualmente aceptada del proceso de medición es la ofrecida por von Neumann en un libro (von Neumann, 1932, 1955) que pasa casi universalmente, si bien equivocadamente, por ofrecer una formulación axiomática y consistente de la mecánica cuántica. Parece haber sido la primera vez que se asignó al observador un papel prominente en la descripción de los dispositivos experimentales. Von Neumann puso en claro que por observador entiende no sólo un aparato de medición sino un sujeto humano capaz de "apercepción subjetiva" (von Neumann, 1932, p. 232). Incluso consideró necesario arroparlo en la doctrina del paralelismo psicofísico. Von Neumann insistió tam-

bién (von Neumann, 1932, p. 224) que la frontera o corte entre observador y sistema observado puede ser desplazada a voluntad. Más precisamente, propuso dividir el mundo en tres partes: I, la cosa observada, II, el aparato de medida, III, el observador. Alegó que puede trazarse una frontera bien sea entre I y el sistema compuesto II + III, bien entre el complejo físico I + II y la entidad psicofísica III. En cualquier caso (*a*) se considera que una medición es algo muy diferente de, digamos, la acción de un campo magnético externo sobre un microsistema dotado de spin —precisamente en virtud de la intervención impredictible, digamos caprichosa, de la mente consciente, y (*b*) el proceso de medición ni es controlable ni plenamente reductible a la física, pues comporta la apercepción subjetiva y la elección arbitraria (von Neumann, 1932, p. 223 y ss.).

El papel activo que esta versión asigna al observador consciente en la determinación del resultado de una medición se pone más en claro mediante el siguiente procedimiento imaginario, al que podemos denominar la técnica de la *mensura interrupta*. Dispóngase un montaje experimental para medir una determinada magnitud en un objeto de un cierto tipo y hagamos funcionar el dispositivo pero abstengámonos de efectuar la lectura final. Al rato, tiremos al aire una moneda: si cara, miramos el indicador y registramos su posición; si cruz, nos vamos del laboratorio. Siendo subjetivistas, nos resistimos a distinguir el hecho *físico* de que el indicador llega a descansar en una determinada posición, del hecho *psíquico* de tomar o no conocimiento de tal hecho físico: lo que es más, rehusamos creer que haya cosa tal como un hecho físico autónomo. Entonces nos vemos obligados a concluir que el resultado de una medición, esto es, el valor de la magnitud en cuestión, depende de la conciencia del observador. Supongamos además que se acata el credo operacionalista de que los valores calculados son valores medibles: entonces concluiremos que el observador consciente es miembro esencial de la teoría cuántica y, en general, que el Hombre ya no puede ser ignorado por la física (Heitler, 1963, pp. 34-35).

Volvamos a la tripartición del mundo de von Neumann: harto inconsistentemente, esta división, proclamada esencial, no está incorporada a la teoría: es vacía. De hecho, *en parte alguna* del libro de von Neumann se especifican las propiedades del observador (sistema III),

ni siquiera esquemáticamente: (*a*) su discusión de los sistemas compuestos (von Neumann, 1932, capítulo VI, sección 2) que monta el escenario para su tratamiento del proceso de medición (von Neumann, 1932, capítulo VI, sección 3) concierne al objeto "observado" acoplado al aparato de medición, esto es, I + II, un compuesto de sistemas físicos sin mezcla de componentes mentales; (*b*) von Neumann dice explícitamente que el sujeto "permanece fuera del cálculo" (von Neumann, 1932, pp. 224, 234). Ahora bien, algo que no figura en la teoría pero que se supone ser su signo distintivo (en cuanto opuesto a la teoría clásica de la medición), es un ítem huero, un fantasma, una variable oculta en el mal sentido de la expresión.

Pero el sujeto cognoscente no es el único fantasma de la teoría, o más bien pseudoteoría, de la medición de von Neumann. Un ingrediente genuino de la misma posee también esta cualidad fantasmagórica: es el estado del sistema observado antes de que se lleve realmente a cabo una medida. Pues si semejante estado es empíricamente desconocido y, sobre todo, incognoscible, entonces no debería figurar en una teoría que se supone respetuosa de una filosofía empirista. (En cambio puede figurar en una filosofía alternativa, pues puede ser considerado como una hipótesis a contrastar por la observación.) Más aún, sostener, como hace von Neumann, que una medida pone de relieve una transición desde un estado desconocido a un vector propio impredictible del "observable" medido, es explicar lo oscuro por lo más oscuro.

En todo caso, un boceto de una teoría de mediciones altamente idealizadas de magnitudes arbitrarias, circundada por una charla vacía acerca de fútiles observadores, no puede pasar por una teoría de la medición real aun si la aprobara (bien que no utilizara) el grueso de la profesión física. Una razón del fracaso de von Neumann en proporcionar una teoría genuina de la medición reside en que no hay cosa tal como una medida arbitraria. Una segunda razón reside en haber aceptado él acríticamente la interpretación ortodoxa de la mecánica cuántica que aprendió de los físicos, sin advertir que esta interpretación hace redundante la medición. (Recordemos la versión estricta de Copenhague discutida en la sección 3.1.) En efecto, según esa interpretación, un valor propio no es un valor que actualmente posea un sistema sino un valor medido. (Hemos argüido en la sección 2.2 que

esta interpretación es adventicia e inválida.) Por lo que de adoptarse la interpretación ortodoxa no sería necesaria ninguna teoría separada de la medición. Ahora bien, si los valores propios son valores medibles, entonces las funciones propias deben representar los estados de los sistemas bajo observación. En cambio, un vector de estado general (una combinación lineal de funciones propias o vectores propios) debe representar un estado de un sistema antes o después de ser observado, particularmente si se abraza la interpretación subjetiva de la probabilidad, como von Neumann hizo la mitad de las veces. No ve que carece de objeto construir toda una teoría (mecánica cuántica menos teoría de la medición) centrada alrededor de la ecuación de evolución de tales estados inobservables. Ni advierte que la dualidad de los dos tipos de procesos, el del colapso del vector de estado por la medición (proceso 1) y el de la evolución suave ("causal" en la incorrecta terminología standard) de acuerdo con la ecuación de Schrödinger (proceso 2), contradice la misma filosofía que adoptó, pues no se formula toda una teoría sobre un proceso que es, en principio, inobservable. Finalmente, von Neumann no ve tampoco que —como apuntó Margenau tiempo ha (Margenau, 1936)— todos los cálculos de la mecánica cuántica, en particular los que han sido comprobados por el experimento, conciernen a procesos del segundo tipo, a saber, los que satisfacen la ecuación de Schrödinger, más que a procesos del primer tipo. Por consiguiente, si fuera posible una teoría general de la medición, lo que es dudoso, lo natural sería abandonar el postulado de proyección de von Neumann y aplicar la ecuación de Schrödinger (o un equivalente) al complejo objeto-aparato considerado como entidad puramente física que consta de dos componentes (Everett, 1957; Wheeler, 1957; Danieri *et al.*, 1962; Bohm y Bub, 1966; Bunge, 1967a) —o, aún mejor, tratarlo como un problema de muchos cuerpos. En todo caso, una teoría de la medición sería una aplicación de una teoría básica más que un capítulo de la misma. No obstante, la posibilidad misma de una teoría general de la medición, sea clásica o cuántica, es problemática pues un medidor universal no mediría nada en particular.

Así, nos encontramos en esta anómala situación. Primero, se alega que sólo una discusión en torno a operaciones empíricas, tales como mediciones, puede proporcionar el contenido o significado físi-

co del formalismo matemático de la teoría cuántica. Ello encaja con la obsoleta doctrina verificacionista del significado pero es inconsistente con la práctica de diseñar, analizar y evaluar operaciones empíricas a la luz de teorías. Segundo, la teoría cuántica standard de la medición (de von Neumann) no recibe la bendición de los proponentes de la interpretación, igualmente standard, de la mecánica cuántica. Tercero, la teoría de la medición de von Neumann es prácticamente inexistente y se supone que contiene un concepto, el de observador, que es extrafísico y, sobre todo, no ha sido incorporado a la (pseudo) teoría: permanece fuera de sus fórmulas, revolotea sobre ellas sin lograr mezclarse de hecho con los componentes genuinos de la teoría. Cuarto, no se ha manejado caso real alguno con ayuda de la teoría de la medición de von Neumann. El mismo dio un ejemplo que, por referirse a dos masas puntuales, no es un ejemplo de medición real; dejó la discusión de los ejemplos reales, enormemente complicados, al lector (von Neumann, 1932, p. 237). En consecuencia, esta teoría continúa *sin ser contrastada*: en efecto, no ha producido ni una sola predicción verificada. Incluso un distinguido defensor de la ortodoxia concede que "no hay teoría realista de dispositivos reales de medición" (Stapp, 1971).

En resumen, la teoría cuántica standard de la medición, de la que se alega que entroniza al observador en la física teórica, es una teoría por entero fantasmagórica. Consecuentemente, los habituales intentos de discutir los fundamentos de la mecánica cuántica, y, en particular, su significado, en términos de la teoría de la medición, van tan descaminados como los intentos de revelar la naturaleza del hombre por la vía de la teología. Peor, el objetivo de la medición es descender a particulares, lo que sólo puede llevarse a cabo con ayuda de piezas específicas de equipo. Y todo dispositivo específico de medición requiere una teoría específica. Y toda teoría específica semejante es una aplicación de varias teorías generales: en realidad es un conjunto de teorías generales junto con un modelo determinado de la situación experimental. Por ello, no cabe esperar que ninguna teoría sola dé cuenta de todo dispositivo posible de medición, excepto de modo tan superficial que sería inútil para explicar y predecir el comportamiento de un concreto montaje experimental. Por consiguiente, la estricta versión de Copenhague, según la cual no debería perderse tiempo en tratar de

construir una teoría cuántica de la medición, es correcta si bien por razones equivocadas. Pero dejando a un lado la postura que se adopte ante esta controvertida cuestión, la cuestión filosóficamente importante es que ninguna de las teorías cuánticas existentes de la medida se ocupa del Observador, *pace* los repetidos intentos verbales de pasarle de contrabando al escenario.

3.3. *El experimento presupone el realismo y lo confirma*

Por extraño que parezca, los opositores del realismo tratan de argumentar a partir de los aspectos más tangibles de la física, a saber, la física de laboratorio. Los argumentos favoritos son éstos. "Una cantidad física no tiene valor a menos que sea medida. Ahora bien, medir es una acción humana; por tanto, las cantidades físicas adquieren un valor preciso sólo como resultado de ciertas acciones humanas. Asimismo, una cosa no alcanza un estado determinado a menos que se la prepare para estar en tal determinado estado. Ahora bien, la preparación de un estado es una acción humana; de suerte que los objetos físicos adoptan estados definidos sólo como resultado de ciertas acciones humanas."

Estos argumentos, aunque populares, son circulares, pues sus conclusiones aseveran los mismo que sus premisas. De hecho, "medir" y "preparar" son términos pragmáticos que elucidan las premisas menores. La premisa mayor dice todo cuanto desea aseverar el no realista, a saber que todo lo que existe, existe así porque alguien ha decidido hacerlo de esa manera o, equivalentemente, esas propiedades y estados no tienen existencia autónoma sino que son dependientes del observador. Más aún, estas premisas son falsas, pues descansan en una confusión entre ser y conocer. Ciertamente una magnitud no tiene valor *conocido* a menos que sea medida. Pero ello no entraña que no *tenga* valor definido cuando no se la está midiendo. La tesis contraria conduce a alegar que el investigador no investiga el mundo sino que lo crea según avanza, lo que es filosóficamente grotesco, ya que le conduce al idealismo subjetivo y, últimamente, al solipsismo.

La tesis no realista es también matemáticamente insostenible. De hecho, al formular una teoría física se enunciará, por ejemplo, que

una cierta propiedad viene representada por una función real, y se supondrá o esperará que las mediciones sean capaces de muestrear tales valores al menos dentro de un intervalo del rango íntegro de la función. Se asume, en otras palabras, que la función *posee* ciertos valores durante todo el tiempo pues, de no tenerlos, no sería una función —por definición de "función". Igual pasa con los operadores que se supone representan variables dinámicas: se supone que tienen valores propios definidos aun cuando no se lleve a cabo ninguna medición de tales propiedades, pues de lo contrario no serían objetos matemáticos bien definidos. Ello no entraña que un sistema físico tenga en todo momento una posición y una velocidad precisos (o, en general, que esté en todo instante en un estado propio simultáneo respecto de todos sus "observables"), sino sólo que no llegamos a conocer tales valores precisos. Como en la mecánica cuántica las variables dinámicas son variables aleatorias, tienen distribuciones (incluso para un sistema físico único) más bien que valores numéricos definidos. Pero estas distribuciones y, en general, las formas bilineales construidas con los operadores y los vectores de estado, poseen valores definidos en cada punto del espacio y el tiempo, pues son funciones de punto ordinarias.

En resumen, la tesis de que los valores de las funciones y los valores propios de los operadores son valores medidos es matemáticamente insostenible. Ciertamente, la decisión de medir o preparar un sistema, a la vez que seguir las operaciones de laboratorio, son quehaceres propios de los humanos, y los resultados de estas acciones dependerán de ellos como el resultado de cualquier otra acción humana. Pero los humanos son parte de la naturaleza, su acción sobre su entorno es eficaz sólo en cuanto se basa en algún conocimiento de la naturaleza, y sólo el aspecto físico de tales acciones es relevante para la física: las mentes no ejercen acción directa sobre las cosas y, en el supuesto de ejercerla, la física sería incompetente para dar cuenta de ella. Por cierto que el acto de preparación modifica el estado inicial de la cosa, sea o no un microsistema; pero para que tal cambio ocurra, la cosa debe estar disponible o ser producida a partir de otras cosas que estuvieran allí al comienzo, también, el cambio debe ser un cambio completamente real aun cuando dirigido por un sujeto.

Con la excepción de los subjetivistas extremos, quienes esperan avanzar sin hacer ninguna operación empírica, todo el mundo conce-

de que la medición y la experimentación son esenciales a la investigación física. Ahora bien, para que semejante operación proporcione una genuina evidencia empírica, debe ser real: los sueños y los experimentos mentales pueden ser heurísticamente valiosos pero no prueban ni refutan nada. En otras palabras, lo menos que uno hará al evaluar un experimento es verificar si el dispositivo experimental es real; de lo contrario hablará de un plan para un experimento o incluso de un fraude. Desde luego, todo montaje experimental es artificial en el sentido de ser planeado, realizado y controlado por humanos, sea directa o indirectamente. Pero tal sucede con los coches y los satélites artificiales, y, sin embargo, nadie confundiría con tales artefactos a los observadores. Ahora bien, no puede satisfacernos que un cierto dispositivo sea real a menos que también lo sea su entorno inmediato, pues de lo contrario carecería de objeto construir aisladores y elaborar correcciones de temperatura y presión, inspeccionar el sistema en búsqueda de posibles perturbaciones externas, pérdidas, etc. Más aún, todo componente del sistema debe ser real para que el todo sea real. Si los componentes de un sistema complejo fuesen mentales más que físicos, darían lugar a un todo psíquico. Ello contradice el alegato de los filósofos de Copenhague según el cual, mientras los macrosistemas (v. g., aparatos) pueden ser reales, sus constituyentes atómicos carecen de existencia autónoma. Desde luego, se comete a menudo el error de creer que algo hay ahí afuera cuando de hecho está ausente. Pero errores de este tipo pueden eventualmente reconocerse como tales, y semejantes correcciones muestran cuánto apreciamos la suposición de que en el laboratorio se manejan cosas reales.

En resumen, la física experimental supone la realidad de los objetos que manipula, y contrasta algunas de las hipótesis propuestas acerca de la existencia de sistemas físicos. La física experimental carece de utilidad para una teoría física que no haga suposiciones de existencia, y la física teórica no puede esperar ayuda de experimentadores que no quieran manchar sus manos con cosas reales.

4. Cuatro estilos posibles de teorizar

4.1. *Las versiones realista y subjetivistas*

A fin de evaluar los méritos y deméritos de las diferentes filosofías discutidas hasta aquí, trataremos de formular rigurosamente (esto es, axiomáticamente) una teoría muy simple en cuatro formas diferentes, correspondiente cada una de ellas a una de estas filosofías. (Surtirá el efecto lateral de apoyar la tesis de que la investigación científica se halla lejos de ser filosóficamente neutral.) Empezaremos con las teorías realista y subjetivista, teorías de las que podemos ocuparnos conjuntamente debido a su inambiguo carácter monista.

Sea una teoría que se refiera a un sistema físico (alternativamente, un sujeto) que o bien está en uno de los dos estados A y B, o salta de uno de ellos al otro de modo tal que cada uno de los cuatro acaecimientos posibles, $\langle A, A\rangle$, $\langle A, B\rangle$, $\langle B, A\rangle$, y $\langle B, B\rangle$, posee una probabilidad dada. (El primero y el cuarto son, desde luego, sucesos nulos.) Cinco conceptos primitivos específicos (indefinidos) cumplirán la tarea: el conjunto Σ de sistemas (alternativamente, de sujetos), una función de estado S, dos constantes A y B, y la función de probabilidad Pr. La diferencia entre las dos teorías, la realista y la subjetivista, reside en el referente: en el primer caso, la clase de referencia se interpreta como un conjunto de sistemas físicos, mientras que en el caso subjetivista se la interpreta como conjunto de sujetos. Consiguientemente, las funciones S y Pr devienen, sea propiedades de sistema físico, sea propiedades de un sujeto. Para ahorrar espacio, la interpretación subjetivista se indicará mediante paréntesis y *bastardilla*. Sólo se formularán los fundamentos axiomáticos.

Axioma 1. Hay sistemas físicos (*sujetos*) del tipo Σ. [De modo ligeramente más detallado: (a) $\Sigma \neq \emptyset$. (b) Todo $\sigma \in \Sigma$ es un sistema físico (*sujeto*).]

Axioma 2. Cualquier sistema físico (*sujeto*) del tipo Σ se encuentra en uno cualquiera de dos estados (*estados mentales*): A y B. [Más explícitamente: (a) S es una función muchos-uno de Σ en $\{A, B\}$. (b) A y B representan estados (*estados mentales*) de un sistema físico (*sujeto*) del tipo Σ.]

Axioma 3. (a) *Pr es una medida probabilista en* $\{A, B\}^2$. (b) La probabilidad de cualquier par en $\{A, B\}^2$ es no nula [todas las transiciones son posibles]. (c) $Pr\ (\langle A, A\rangle) + Pr\ (\langle B, B\rangle) + Pr\ (\langle A, B\rangle) + Pr\ (\langle B, A\rangle) = 1$. (d) $Pr\ (\langle A, B\rangle)$ representa la intensidad de la tendencia o propensión (*creencia racional o certeza*) con que un sistema físico (*sujeto*) en el estado (*estado mental*) A salte al estado (*estado mental*) B, y similarmente para las demás probabilidades.

Las diferencias ostensibles entre las dos teorías son éstas. (*a*) Mientras que la teoría realista concierne a un sistema físico idealizado (un modelo de muchas situaciones reales), la teoría subjetivista concierne a un sujeto idealizado (modelo apenas adecuado de nada salvo de un oligofrénico). (b) Mientras que la teoría realista informa acerca de acaecimientos físicos, la subjetivista informa de acaecimientos psíquicos. (c) Mientras que la teoría realista implica probabilidades de transición que pueden comprobarse observando frecuencias de acaecimientos externos, la teoría subjetivista implica frecuencias de transición observables introspectivamente. (d) Mientras que la teoría realista es contrastable en un laboratorio físico, la subjetivista no lo es.

Ambas teorías son fenomenológicas o teorías de caja negra en el sentido de que ninguna da cuenta del mecanismo de transición. Pero pueden profundizarse hasta explicar las transiciones. En cualquiera de ambos casos, una profundización exige la introducción de nuevos conceptos básicos y correspondientemente de nuevos postulados. (Recordemos la regla tácita: Por cada nuevo primitivo, al menos un nuevo postulado formal y un nuevo postulado semántico.) Así, la teoría realista puede expandirse en una teoría más vigorosa que explique las probabilidades de transición en términos de, digamos, el número de ocupación de estados. Por ejemplo, la probabilidad del acaecimiento $\langle A, B\rangle$ podría considerarse proporcional al número de ocupación del estado A e inversamente proporcional al número de ocupación de B. O, por el contrario, cabría establecer una teoría de variables ocultas: una teoría que contuviese variables adicionales con sus ecuaciones de evolución que explicaran a la vez la existencia de los estados y las transiciones entre ellos. Tal teoría sería aún una teoría física.

En cambio, la teoría subjetivista podría expandirse en una cualquiera de las siguientes direcciones opuestas: las nuevas variables podrían ser conceptos psicológicos adicionales, o algunas podrían ser

conceptos neurológicos (fisiológicos). En el primer caso podría obtenerse una extensión homogénea: la nueva teoría permanecería dentro de la psicología. Pero, en el segundo caso, la teoría más fuerte y profunda poseería un carácter mixto: contendría a la vez variables físicas y psicológicas (o, más bien, neurofisiológicas), de suerte que describiría un sistema de doble nivel. Una extensión posterior podría incluso analizar toda variable psicológica que permaneciese en la extensión inicial en términos neurofisiológicos.

Arriesguemos las siguientes conclusiones: toda profundización de una teoría realista retiene su carácter físico, en tanto que algunos de los intentos de profundizar una teoría subjetivista cambian su carácter, entrando así en bancarrota la filosofía del subjetivismo. En otras palabras, parecería que el subjetivismo puede mantenerse al precio de evitar posteriores profundizaciones, lo que no es el caso del realismo. Pero no nos incumbe ahora la profundidad. Nuestra finalidad era sólo mostrar que una teoría puede ser formulada en términos realistas o subjetivistas. Veremos ahora que ninguna de las otras dos filosofías que hemos estado discutiendo permite esto.

4.2. *El apuro de Copenhague*

En una teoría construida según el más puro estilo de Copenhague debería haber una única clase de referencia: el conjunto de unidades sagradas selladas constituido por el objeto, el dispositivo observacional, y el observador. A primera vista, no habría dificultad en obtener la versión de Copenhague de cualquier teoría física, tal como la expuesta en la última sección: parecería que una reinterpretación de Σ como el conjunto de trinidades bastaría. De hecho, hay dos obstáculos técnicos en el camino, uno de naturaleza formal, el otro semántico.

El obstáculo matemático para la copenhaguenización de las teorías es éste. La pretensión de que el referente de una teoría sea único (equivalentemente, que su clase de referencia sea homogénea en el sentido de la sección 1.1), y, sobre todo, inanalizable, contradice el alegato de que toda "cantidad" (magnitud) es relacional en el sentido de que concierne no sólo al sistema físico de interés (v. g., un átomo)

sino también a su entorno (artificial) y al observador a cargo del último. Estas dos pretensiones de la escuela de Copenhague son, como es obvio, mutuamente contradictorias, pues la primera conduce a la aserción de que el dominio de las funciones (v. g., distribuciones de probabilidades) de que nos ocupamos incluye un conjunto homogéneo de bloques indivisibles, en tanto que la segunda lleva a la aserción de que el dominio involucra el producto cartesiano del conjunto de sistemas físicos por el conjunto de aparatos y por el conjunto de observadores. Baste esto en cuanto a la dificultad matemática.

La negativa a analizar el referente *unum et trinum* hace imposible la tarea de la interpretación, pues las propiedades a ser asignadas a ese referente no están ni aquí ni allí: ni son estrictamente físicas ni son estrictamente psicológicas. Es por ello por lo que la doctrina de Copenhague es tan oscura como la doctrina de la trinidad, según la cual el Padre (Aparato), el Hijo (Microsistema), y el Espíritu Santo (Observador) quedan unidos en la Divinidad (Fenómeno cuántico). Tomemos, por ejemplo, la noción de estado presente en la microteoría expuesta en la subsección previa. Mientras que en la interpretación realista (alternativamente, la subjetivista) A y B representan estados físicos (alternativamente estados mentales) de un sistema de un tipo definido (físico o psíquico), en la interpretación de Copenhague representarían estados totales o psicofísicos del bloque sistema-aparato-observador. Mas ninguna ciencia de las que existen da cuenta de semejantes entidades complejas (y, sin embargo, unitarias).

En conclusión, es imposible construir según el estilo de Copenhague una teoría *coherente*. En otras apalabras, la interpretación de Copenhague de la teoría cuántica es incoherente, y, más aún, lo es incurablemente (véanse los capítulos 5 y 6). Afortunadamente, el bebé —la mecánica cuántica— no necesita ser arrojado con el agua del baño: hay formulaciones alternativas coherentes de la teoría (v. g., Bunge, 1967a).

4.3. *La versión dualista*

Volvamos a la microteoría imaginaria discutida en la sección 4.1. Su reformulación axiomática a la manera dualista (v. g., operaciona-

lista) exigiría dos conjuntos adicionales distintos: el conjunto I de instrumentos y el conjunto O de observadores u operadores. Estos diversos ítems deberían considerarse como interactuando pero también como distintos. (Si fueran indistinguibles, si constituyesen un bloque sólido, no podrían interactuar.) Por tanto, los conceptos correspondientes deben tomarse como primitivos mutuamente independientes. La versión dualista de nuestra microteoría se basaría entonces en siete conceptos indefinidos en lugar de cinco.

Ahora bien, para que un sistema axiomático sea satisfactorio, debe contener axiomas que especifiquen a la par la estructura matemática y el significado factual de sus términos técnicos básicos. (Esta puede llamarse la condición de completud respecto de los primitivos: véase capítulo 6, sección 4.) Ello es impracticable en el caso de los primitivos adicionales I y O, y aun si fuera factible, apenas sería deseable. Es impracticable porque, mientras que Σ es manejado por una teoría estrictamente física y, sobre todo, bien definida, I y O requieren ir más allá de esa teoría. En efecto, la caracterización de todo aparato en términos teóricos requiere todo un conjunto de fragmentos de diversas teorías. Asimismo, la especificación de cualquier observador supondría todas las ciencias del hombre; antropología, psicología, sociología, etc. La teoría adquiriría entonces un tamaño gigantesco en el supuesto de que pudiera desarrollarse. El programa dualista no es, por consiguiente, viable. Ni tampoco, por las razones que siguen, deseable. Primera, haría imposibles las teorías generales, pues una teoría general es una teoría no vinculada a ningún tipo especial de dispositivos experimentales. Segunda, el programa dualista haría depender el progreso de la física del estado de las ciencias del hombre —por lo que, si hubiera sido adoptado a fines del Renacimiento, la física no habría despegado. Después de todo, la moderna ciencia física nació en oposición al antropocentrismo.

En conclusión, de los cuatro tipos concebibles de teorización dos son impracticables: el de Copenhague y el dualista. Los enfoques realista y subjetivista son factibles pero sólo el primero produce teorías objetivas, contrastables, y, en principio, mejorables.

5. Conclusión: el realismo, confirmado

Empezamos por distinguir dos tipos de interpretación de símbolos físicos: la interpretación estricta, que se adecua a la estructura matemática de la idea correspondiente, y la interpretación adventicia, que la rebasa. Hemos mostrado que, mientras que en la física teórica sólo se autorizan interpretaciones estrictas, en la física experimental se requieren interpretaciones adventicias, pero estas son válidas sólo en la medida en que están apoyadas en teorías (v. g., teorías que dan cuenta de las operaciones).

Hemos aplicado entonces esta distinción a algunos conceptos físicos. El resultado ha sido que las únicas interpretaciones estrictas de la física teórica son la realista y la subjetivista, siendo todas las restantes adventicias. Pero hemos mostrado que no hay base para la interpretación subjetivista de dos funciones que pasan por ser las puertas a través de las cuales la mente entra en la imagen física, a saber, el vector de estado y la probabilidad. Hicimos esto examinando las variables independientes, esto es, los dominios de esas funciones, al tiempo que recordábamos algunas de las presuposiciones y metas de la investigación científica. El rechazo del subjetivismo nos dejó con el realismo como única filosofía viable de la física.

A continuación exploramos la posibilidad de formular una y la misma teoría en cada uno de los cuatro moldes filosóficos en competencia: realismo, subjetivismo, perspectiva de Copenhague, y dualismo (en particular, operacionalismo). Resultó que, mientras los dos primeros proyectos son viables, el subjetivista no conduce tan fácilmente a la generalización y la profundización, y, en todo caso, es incurablemente incontrastable, por tanto, no científico. En cuanto a la versión de Copenhague, resultó imposible sin contradicción, y la dualista (en particular, la operacionalista) resultó impracticable. Una vez más se vindicó el realismo como la única filosofía de la física.

Finalmente, volvimos nuestra atención a la teoría de la medición, de la que a menudo se dice que es otra puerta por la que el espíritu entra a formar parte de nuestra nueva imagen del mundo. Hallamos que la teoría standard (de von Neumann) es fantasmagórica en más de un punto: apenas existe como teoría realista de mediciones efectivas y

habla de un observador que es supernumerario, pues no figura en ninguna fórmula. De nuevo aquí, nuestro análisis ha confirmado el realismo, y, en particular, la tesis obvia pero importante de que la física se refiere a sistemas físicos, sin importar la fraseología no realista que tan a menudo circunda las fórmulas físicas y las operaciones físicas.

Ahora bien, hay diversas opiniones (apenas teorías) realistas del conocimiento. ¿A cuál apoya nuestro análisis semántico y metodológico? La respuesta, desde luego, es el *realismo crítico*. Esta posición puede caracterizarse por las siguientes tesis:

(1) Hay cosas en sí, esto es, objetos cuya existencia no depende de nuestra mente. (Notemos que el cuantificador es existencial, no universal: los artefactos depende obviamente de mentes.)

(2) Las cosas en sí son cognoscibles, bien que parcialmente y por aproximaciones sucesivas antes que exhaustivamente y de un solo plumazo.

(3) El conocimiento de una cosa en sí se alcanza conjuntamente mediante la teoría y el experimento, ninguno de los cuales puede pronunciar veredictos finales sobre nada.

(4) Este conocimiento (conocimiento factual) es hipotético más que apodíctico, por lo que es corregible y no final: mientras que la hipótesis filosófica de que existen cosas, y pueden ser conocidas, constituye una presuposición de la investigación científica, toda hipótesis científica acerca de la existencia de un tipo especial de objeto, sus propiedades, o leyes, es corregible.

(5) El conocimiento de una cosa en sí, lejos de ser directo y pictórico, es indirecto y simbólico.

El realismo crítico es la más fértil de todas las gnoseologías porque nos estimula a mirar más allá de toda teoría, por exitosa y perfecta que en un momento dado haya podido parecer. En particular, estimula la exploración de nuevos caminos en la física fundamental que, según parece conceder todo el mundo, puede usar algunas ideas radicalmente nuevas. El realismo crítico también estimula la reconstrucción de las teorías existentes de modo más claro y riguroso —como se verá en el próximo capítulo.

Capítulo 5

LA MECÁNICA CUÁNTICA EN BUSCA DE SU REFERENTE

La mecánica cuántica (de ahora en adelante MC), probablemente la más potente de todas las teorías científicas, es también la de filosofía más débil. Esta debilidad reside básicamente en la incapacidad de enunciar inambigua y persuasivamente cuáles son los referentes genuinos de la teoría. Y esta incapacidad deriva de un deseo de complacer a una filosofía que oscila entre el subjetivismo no diluido y el realismo íntegro. En efecto, la intepretación usual de la MC, según se la encuentra v. g., en los tratados clásicos de von Neumann (1932) y Dirac (1958), como en los manuales standard de Bohm (1951) y Landau y Lifshitz (1958), ha sido formulada según el espíritu y la letra del positivismo inicial de moda entre los científicos durante el período de entreguerras (véase Frank, 1938, 1946; von Mises, 1951; y Reichenbach, 1951).

El compromiso de la formulación usual de la MC con una filosofía apolillada, que ningún filósofo vivo sostiene apenas ya, es responsable en gran medida de las incoherencias interpretativas y de las oscuridades de la teoría. (No nos ocupamos de las incoherencias matemáticas tales como los infinitos.) El principiante siente agudamente gran parte de esta confusión, pero el profesional aprende a vivir con ella. El profesional se habitúa, de hecho, a manejar un instrumento conceptual que profesa no entender: ocasionalmente, llega incluso a alegar que la codicia por comprender es un residuo pecaminoso de la física clásica. Puede admitir que la MC es enmarañada y en ocasiones hace de ello virtud, arguyendo que los acaecimientos cuánticos son,

en última instancia, opacos a la razón (cf. Bohr, 1934) y que debemos considerarnos afortunados si, sin comprender en el sentido clásico de la palabra, triunfamos en el cómputo de predicciones confirmadas por la observación y el experimento.

Esta situación es intolerable para el filósofo y el historiador de la ciencia, quienes constatan que la MC es un triunfo de la razón, que nada es claro al principio, y que las barreras a la razón tienen la costumbre de desmoronarse una tras otra. El filósofo puede sospechar que la bruma que envuelve a la MC es de naturaleza filosófica y que puede, por consiguiente, traspasarla con instrumentos que no son los usuales del físico —a saber, la lógica, la semántica, la epistemología, y la metodología. Es más, el filósofo puede sospechar que la bruma que circunda la MC ha estado retrasando el progreso en la teoría física básica durante los últimos treinta años, esto es, una vez que se erigió el edificio principal de la MC. En efecto, las aplicaciones triunfales de la MC básica han sido tan numerosas que sólo una minoría de físicos están explorando caminos radicalmente nuevos. Los físicos teóricos han llegado a ser, en este respecto, incluso más conservadores que los teólogos. Como resultado, no se ha logrado ninguna revolución en los tiempos recientes en la teoría microfísica básica ni se intentará ninguna en la medida en que la teoría actual continúe considerándose perfecta o poco menos: la complacencia conduce al estancamiento y a la decadencia. Sólo un Concilio Cuántico puede ayudarnos a salir del marasmo.

Es aconsejable, por consiguiente, despejar la bruma filosófica que nos impide ver delante, y liberar de ella la MC. La ejecución de estas dos tareas, la crítica y la de reconstrucción, debería ser no sólo interesante filosóficamente sino también útil para el avance del conocimiento.

1. Haciendo frente a la bruma

Como cualquier otra teoría física, la MC consiste en un formalismo matemático dotado de cierta interpretación. La interpretación usual de la MC se conoce como la *doctrina de Copenhague* y fue elaborada por algunos de los gigantes que construyeron la teoría: Bohr,

Heisenberg, Born, Dirac, Pauli, y von Neumann. Esta doctrina, o más bien, conjunto de doctrinas, es bien conocida de los físicos. Lo que la mayoría de ellos no parecen advertir es que la doctrina de Copenhague es científica y filosóficamente insostenible por ser incoherente y no enteramente física. Echemos una ojeada rápida a estos dos rasgos fatales de la doctrina ortodoxa.

Las incoherencias de la MC ortodoxa son a la par formales y semánticas y ambas pueden encontrarse en el cuerpo de la teoría standard y en la metateoría. Una típica incoherencia de tipo formal es ésta. De un lado, se supone, correctamente, que la mayoría de las micropropiedades son peculiarmente cuánticas, esto es, no clásicas —lo que explica el carácter novedoso de la MC *vis à vis* la física clásica. Pero, de otro lado, se dice que estas propiedades caracterizan manipulaciones humanas (operaciones de laboratorio) más bien que trozos de materia. Ahora bien, tales operaciones tienen lugar a nivel macrofísico y son, por consiguiente, descriptibles clásicamente. En resumen, la doctrina contiene el metaenunciado contradictorio: "Los símbolos cuánticos conciernen a hechos (clásicos) no cuánticos".

La fuente de esta contradicción es filosófica: se origina en el credo de que la teoría física no se *refiere* a la realidad (supuestamente un engendro metafísico) sino a la experiencia humana (cosa supuestamente clara). Lo que, desde luego, es verdad es que la teoría se *refiere* a la realidad y es *puesta a prueba* mediante la experiencia humana, contrastando algunas de las consecuencias lógicas de la teoría con hechos que están ahí y bajo control experimental. La doctrina de Copenhague especifica esa pizca de filosofía empirista de la siguiente manera: "No hay acaecimientos cuánticos autónomos sino sólo items cuánticos dependientes del observador: la observación o las operaciones de medición generan las entidades en determinados estados". Pero este enunciado es incompatible con la práctica del físico cuántico: en efecto, la mayoría de los problemas que tratamos dentro del contexto de la MC conciernen a sistemas físicos o químicos que, por hipótesis, no interactúan con piezas de aparatos. Es más, la teoría cuántica de la medición es virtualmente inexistente, pues es incapaz de dar cuenta de los rasgos específicos de los instrumentos de medición que hacen posible las medidas. (Recuérdese el capítulo 4, sección 3.) El credo en cuestión es, sobre todo, inconsistente con la suposición

de que al menos el propio observador es real y está compuesto de microsistemas. En efecto, si cada uno de los átomos de mi cuerpo existe sólo en la medida en que yo puedo observarlos, entonces yo —sistema de átomos— no existo, aunque sólo sea por tener otras cosas que hacer que observar incensantemente mis constituyentes microfísicos. En resumen, la doctrina de Copenhague es lógicamente incoherente y este defecto deriva de su adopción de una filosofía subjetivista. (Para otras incoherencias, véase Bunge, 1959b, 1967a; Landé, 1965, y Popper, 1967.)

La doctrina es incoherente también en otro sentido, a saber, semánticamente. Denominemos *semánticamente incoherente* a una teoría si, en algún punto, introduce predicados que no están emparentados con los predicados de base (conceptos primitivos) de la teoría (Bunge, 1965 y 1967c). Ello puede hacerse siempre, en un contexto no axiomático, gracias a la ley lógica "Si p, entonces p o q". De hecho, si se afirma la fórmula p, entonces puede concluirse "p o q" aun si q contiene predicados totalmente ajenos a los contenidos en la premisa p. Así, tras afirmar la ecuación de Schrödinger podríamos deducir "O bien la ecuación de Schrödinger vale o no es el caso que el observador crea el mundo", lo que es verdad y, más aún, equivalente a "Si el observador crea el mundo, entonces la ecuación de Schrödinger vale". Desde luego, esto es un fraude: los predicados "observador", "crea" y "mundo" no estaban incluidos en los predicados de base del discurso original: surgen de la nada.

Precisamente esta maniobra se realiza constantemente en el contexto de la doctrina de Copenhague. Ejemplo: Enúnciese el problema de computar los niveles de energía posible de un átomo *aislado* de una determinada especie, y termínese interpretando los resultados de su cálculo como los valores posibles obtenidos por un experimentador que perturba activamente el átomo —aun si el átomo está *ex hypthesi* tan alejado que ningún experimentador pueda establecer ninguna interacción con él. Es ir por átomos y volver con observadores. Inconsistencias semánticas como éstas se toleran en todo momento y se originan también por la adhesión a una filosofía subjetivista, en particular, el operacionalismo. Hay un sólo modo de evitar tales incoherencias semánticas, a saber, fijando la base de primitivos (conjunto de conceptos indefinidos) y ateniéndose a ella —en otras palabras, axiomati-

zando la teoría. Si entre los predicados básicos se incluye el concepto de observador, entonces no tienen por qué surgir incoherencias semánticas de ese tipo. Pero estamos sujetos a que surjan incoherencias sintácticas tan pronto como se desea construir el observador a partir de microsistemas que son dependientes del observador. El modo de evitar ambos tipos de incoherencias consiste claramente en axiomatizar la teoría y hacerlo sin utilizar predicados no físicos: esto es, reformular la MC de manera *ordenada y estrictamente física.*

Las inconsistencias formales y semánticas que inundan las formulaciones standard de la MC no podrían evitarse con la adopción de medidas suaves, pues se originan en una vinculación dogmática con una filosofía que es incompatible con el objetivo mismo de la ciencia física: no cabe disponer de una teoría plenamente física si ha de satisfacer exigencias no físicas tales como el postulado de que no hay entidades ni propiedades físicas autónomas (libres del observador). El carácter *semifísico* de las formulaciones standard de la MC es obvio por su terminología: un símbolo que represente una propiedad física de cierta clase se denomina *observable*, y un sistema macrofísico tal como un sistema de referencia o un aparato de medición se denomina *observador*. En lugar de hablar simplemente acerca de una propiedad de un sistema físico, los seguidores de la doctrina de Copenhague tratarán de hablar de un observable *tout court*, o de un observable cuyos valores numéricos vienen determinados (¡o incluso definidos!) por una cierta sucesión de operaciones de laboratorio. Se tolera con ello el más puro antropocentrismo.

Y, sin embargo, un análisis de los símbolos que figuran en la MC desmiente esta interpretación. Así, el operador de posición del microsistema i ésimo en un determinado agregado se escribirá x_i: la i suscrita nombra un individuo físico concreto (pero arbitrario) que, por cuanto sabemos, puede habitar en un rincón abandonado del universo. Y el promedio cuántico de x_i para un individuo fijo i es función del tiempo, no función del observador y de los parámetros que describen las circunstacias de sus actos de observación. Algo similar sucede con cualquier otro "observable" en la MC básica. En resumen, el observador es supernumerario en la MC: se le introduce sólo para complacer la filosofía adoptada pero nunca se le toma en serio en los cálculos.

Peor: la filosofía inherente a la MC ortodoxa hace imposible la propia física al subordinarla a la psicofisiología del observador humano. Repárese en que no es sólo que los enunciados de toda teoría física hayan de ser empíricamente contrastables —lo que por supuesto es verdad. Lo que la doctrina de Copenhague alega es que todos esos enunciados deberían *referirse* a situaciones de contrastación, pues de lo contrario carecerían de significado. (Algunos llegan incluso a alegar que la mente del observador debería incluirse también: Wigner, 1962 y Heitler, 1963.) Lo que sucede es que la escuela de Copenhague confunde el *referente* de una teoría con su *contrastación*: identifica una cuestión metodológica con una semántica. Arrastra, por consiguiente, uno de los embrollos responsables del operacionalismo. (Recuérdese el capítulo 1.)

La escuela de Copenhague al introducir, entonces, de contrabando al observador en la MC convierte a ésta en psicofísica más que puramente física. Ello habría satisfecho a Mach y a su retoño, el Círculo de Viena, quienes se habían propuesto unificar la ciencia sobre la base de la psicología humana. Pero deja de satisfacernos, aunque sólo sea por las siguientes razones. En primer lugar, porque, en la medida en que la física clásica coexiste con la física cuántica, habrían de usarse dos epistemologías mutuamente incompatibles: la realista concerniente al macronivel y la subjetivista asociada al micronivel. En segundo lugar, porque si el observador, con su equipo psíquico entero, hubiera de entrar en la física como referente, entonces las teorías físicas no podrían posiblemente someterse a contrastaciones sin la asistencia de una psicofisiología altamente desarrollada. Pero la MC no contiene suposición alguna relativa a la constitución y comportamiento de El Observador: ni siquiera los especifica la formulación ortodoxa. Sin embargo, comoquiera que la formulación usual implica como referentes a los observadores, no sólo como constructores y contrastadores de la teoría, entonces para que la palabra "observador" tenga sentido, debería adjuntarse a la física un cuerpo substancial de psicofisiología. De hecho, es el proceso inverso el que tiene lugar: a saber, la psicofisiología está usando más y más física, mientras que los físicos teóricos que rinden servicio verbal sólo a la interpretación de Copenhague están triunfando al exlicar y predecir hechos físicos sin usar la psicofisiología. Ello muestra que el concepto de observador no sólo es ajeno

a la teoría física, sino que debería ser posible reformular la MC sin la ayuda de este concepto psicofísico. Llevemos a cabo una exposición preliminar de esta posibilidad.

Que una traducción de los enunciados semifísicos característicos de la doctrina de Copenhague a enunciados físicos puede hacerse en todos los casos, viene sugerido por los siguientes ejemplos. La frase

El acaecimiento x aparece al observador y

cuando se la purga de sus ingredientes pragmáticos se reduce a:

El acaecimiento x ocurre en el marco de referencia y [que puede o no estar habitado por un observador].

Y la expresión

La incertidumbre relativa al enunciado de que el acaecimiento x ocurra es el número y

se reduce a

La probabilidad del acaecimiento x es el número y $\leq$ *1.*

Adviértase que una traducibilidad de este tipo no es a una equivalencia lógica: en la mayoría de los casos, los acaecimientos manejados por la teoría se supone que ocurren sin la ayuda del sujeto cognoscente, y un enunciado relativo a la probabilidad de un acaecimiento difiere, tanto conceptual como numéricamente, de un metaenunciado relativo a la probabilidad asignada por alguien a un enunciado objeto. La cuestión es que semejante traducción es posible y que debe llevarse a cabo si deseamos retener la distinción entre mundo externo y mundo interno. Volvamos, pues, a una interpretación puramente física del formalismo matemático de la MC, aun a riesgo de la amonestación de quienes (v. g., Rosenfeld, 1953, 1961) creen que el mero suscitar dudas cualesquiera concernientes a la corrección de los principios básicos de la versión ortodoxa de la MC es futil. Para un filósofo, la futilidad —y también la vanidad— son inherentes al dogma, no a la duda.

2. Disipando la bruma

El formalismo standard de la MC puede interpretarse de modo estrictamente físico, en particular no psicológico. En otras palabras, es posible reinterpretar la MC tal como se interpreta la física clásica, esto es, asumiendo que los entes a los que se refiere la teoría —electrones, átomos, moléculas, etc.— existen por sí mismos. Ello no excluye, desde luego, la posibilidad de que el experimentador modifique estas cosas, v. g., filtrando ciertos estados, o incluso que nos muestre que ciertos microsistemas no eran sino imaginarios. Sólo que el experimentador tendrá que usar medios físicos a este fin: no basta sólo con sentarse, computar e invocar el espíritu de Copenhague. En otras palabras, si el experimentador está implicado, es *qua* ente capaz de influir en los acaecimientos físicos por medios físicos, bien sea directamente con sus movimientos corporales bien sea indirectamente a través de artefactos automáticos. La mente del físico imagina las fórmulas implicadas en las predicciones teóricas y, eventualmente también, en el diseño e interpretación del experimento, mas no actúa directamente sobre los acaecimientos físicos bajo estudio no siendo, por consiguiente, de incumbencia de la propia teoría.

La receta para construir versiones estrictamente físicas de la MC es ésta: "Tómese la formulación standard, púrguesela de sus elementos subjetivistas, y finalmente reorganícese lógicamente lo que queda". Los elementos subjetivistas son, desde luego, el concepto de observador y todas las nociones relacionadas con él, particularmente las de observable y probabilidad subjetiva. En la formulación usual de la MC, el concepto de observador figura, v. g., en el enunciado: "Si el sistema está en un estado propio de su *observable A*, correspondiente al valor propio *a*, entonces un *observador que mida A* en el sistema *obtendrá ciertamente* el valor *a*". Las palabras subrayadas quedan fuera de lugar en un discurso teórico pues apuntan al sujeto y a algunos de sus actos y estados mentales.

Más aún, entendido literalmente el enunciado anterior es falso, porque las propiedades típicamente cuánticas no son directamente observables (en el sentido epistemológico) y porque los valores medidos son usualmente sólo aproximaciones a valores computados teóri-

camente. En cuanto al concepto de certeza, también éste es ajeno a una teoría física. Una teoría estrictamente física, si estocástica, debe incorporar una interpretación objetiva, y en particular física, del cálculo de probabilidades: debe interpretar la probabilidad como propiedad física no como medida de la certeza (véase capítulo 4, sección 2.4; Poincaré, 1912; Smoluchowski, 1918 y Popper, 1959). Ello no excluye la posibilidad de contar con modelos psicológicos de la teoría de la probabilidad: sólo evita, en interés de la coherencia, mezclar los dos modelos. El postulado que acabamos de criticar habría que remplazarlo por algo como esto: "Si el sistema está en un estado representado por un estado propio del operador representando su propiedad A, entonces el valor numérico que tiene A es el valor propio a correspondiente a ese estado".

Una vez la teoría existente ha sido purgada de todos sus conceptos no físicos, debe ser reorganizada lógicamente, aunque sólo sea para impedir recaídas en el subjetivismo. No hay receta simple para cumplir esta tarea, pues hay diversas axiomatizaciones concebibles de cualquier teoría axiomatizable. (Véase, no obstante, el capítulo 6, sección 3.) El fundamento axiomático de la MC propuesto por el autor (Bunge, 1967a, 1967e) emplea los siguientes conceptos primitivos (indefinidos): "microsistema" (o *cuantón*), "entorno (microfísico o macrofísico) del microsistema", "espacio ordinario (tridimensional)", "espacio de los estados", "propiedad de un microsistema", "operador representativo del mismo" (el "observable" de la versión ortodoxa), y diez conceptos más que son mucho más específicos —entre ellos, los de masa, carga, y operador de energía. Cada uno de estos conceptos se caracteriza (no se define) por medio de ciertos postulados —la mayoría de los cuales están lejos de ser evidentes y todos son hipótesis a ser justificadas por el éxito de la teoría en dar cuenta de hechos controlables experimentalmente.

Los postulados de esta versión realista de la MC caracterizan tanto la forma y naturaleza de los conceptos básicos cuanto su significado físico: el sistema de axiomas está por tanto determinado a la par formal y semánticamente. Así, un miembro conspicuo de este conjunto de axiomas enuncia que ciertos conjuntos son no vacíos y que sus miembros son respectivamente microsistemas y sus entornos. Esta perogrullada física es filosóficamente importante: hace a la teoría no va-

cía y la compromete con el realismo epistemológico. Otro axioma enuncia que, si un operador representa una propiedad física de un microsistema, entonces los valores propios de ese operador son los únicos valores de la propiedad dada. Nada se dice aquí acerca de observaciones. La medición intervendrá, como es usual, en la fase de contrastación. Por ejemplo, se elegirá un agregado de microsistemas similares colocados en un determinado medio, se medirá alguna propiedad suya, y la distribución de frecuencias hallada experimentalmente (histograma) se contrastará con la distribución de probabilidad calculada, concerniente a un sistema individual. En lugar de postular dogmáticamente que los valores experimentales son idénticos a los teóricos —como hace la doctrina de Copenhague— ambos conjuntos de valores se compararán. En caso de discrepancia se criticará bien a la teoría, bien al experimento, o incluso a ambos.

Se tendrá el cuidado de no llamar *observables* ni a las micropropiedades ni a sus representantes conceptuales (las variables dinámicas). En primer lugar, porque no son perceptibles bien que sean escrutables de modo indirecto, tal como la impaciencia puede inferirse de ciertos gestos y expresiones verbales. Además, denominar *observables* a las propiedades cuánticas es dar por resuelta la importante cuestión concerniente al diseño de los medios para medirlas. Finalmente, como ya se ha sugerido, el concepto de observable no es sólo un predicado físico, según muestra su análisis: "El objeto w es observable por el sujeto x en las circuntancias y con los medios (empíricos y teóricos) z". Si la física teórica no ha de confundirse con la psicología y la epistemología entonces el sujeto ha de mantenerse fuera de la primera. El cometido del sujeto es construir teorías y contrastarlas, no ponerse como referente suyo. Por estas razones las variables dinámicas que figuran en la MC no deberían llamarse "observables".

Las magnitudes cuánticas típicas son variables aleatorias, en el sentido de que con ellas se asocian distribuciones de probabilidad. Ello vale, en particular, para la posición y el impulso de un microsistema —que deberían llamarse respectivamente *quosición* y *quomento* a fin de poner en relieve su carácter no clásico. Que la MC es básicamente probabilística, no se supone sino que se prueba en nuestra versión de la teoría: en efecto, se muestra que la función que representa un estado cuántico satisface los axiomas del cálculo de probabilida-

des. En este sentido, ve uno que, en su estado actual, la MC no contiene variables ocultas (esto es, no aleatorias). Por lo tanto, la célebre prueba de von Neumann sobre la imposibilidad de introducir variables ocultas (libres de dispersión) en la MC se convierte en un metaenunciado trivial obtenido meramente escrutando los conceptos primitivos del sistema de axiomas y probando que todos aquellos que funcionan como variables dinámicas son variables aleatorias. Todo intento de refutar la tesis de von Neumann con referencia a la teoría vigente está destinado, pues, a fracasar tan miserablemente como cualquier intento de prohibir la construcción de teorías diferentes.

El carácter básicamente estocástico de la MC puede entenderse de varias maneras. Una, consiste en suponer que la MC básica no se refiere a un cuantón individual sino a un conjunto estadístico de cuantones: no nos sorprendamos, pues, de que los diversos componentes de un conjunto en un determinado estado cuántico tengan diferentes posiciones e impulsos. Sin embargo, la MC básica vale para el microsistema individual, v. g., para cada uno de los átomos que cruzan un cristal e inciden en una pantalla fluorescente. Lo que sucede es que la teoría se contrasta por medio de agregados numerosos de cuantones: así, la distribución de posiciones computada se compara con la figura de "difracción" que emerge en la pantalla según el número de impactos individuales aumenta. En otras palabras, tal como cualquier otra variable aleatoria, la función de estado se *refiere* a un cuantón individual (situado en un determinado medio) pero su forma precisa se *contrasta* con la ayuda de agregados estadísticos de cuantones. Y siempre que nos ocupemos de agregados de microsistemas coexistentes —especialmente si interactúan— deben ser manejados por medio de una teoría más compleja (estadística cuántica) basada en la MC elemental.

Otra posibilidad consiste en suponer que la MC básica no se refiere a una cosa individual arbitraria ni a un agregado actual de cosas similares sino a un conjunto conceptual de tales entidades —un conjunto de Gibbs (Bergmann, 1967). Una tercera posibilidad es considerar las propiedades cuánticas como latentes o potenciales más que como actuales, actualizándose o manifestándose según la interacción del sistema con un instrumento de medición (Margenau, 1950; Bohm, 1951). Pero ello convertiría todas las variables dinámicas en depen-

dientes del observador, pues se harían manifiestas a voluntad del observador.

No obstante, es posible librar la concepción de las propiedades cuánticas como latentes de su matiz subjetivista del siguiente modo. Por lo regular, un cuantón *no tiene* una posición puntual ni un valor único del momento; tiene sólo distribuciones de posición momento. En general, estas distribuciones cambian con el tiempo bajo la acción del entorno, esté o no el último bajo control humano. En particular, un cuantón puede adquirir una estrecha localización espacial. A este fin, basta con que se lleven a cabo las manipulaciones dirigidas a la preparación de un estado localizado. Pero ello es innecesario: la propia naturaleza lo hace de tanto en tanto. Por esto es que en ocasiones nosotros, parte distinguida de la naturaleza, logramos localizar átomos o producir haces de electrones casi monocinéticos. En todos estos casos, una cierta distribución objetiva se hace más estrecha, casi puntual, y en este sentido emerge o deviene actual una propiedad clásica —mientras que su conjugada deviene clásicamente menos definida.

En un sentido, este límite puntual de la distribución es una propiedad disposicional o potencial: en efecto, el cuantón posee la posibilidad de adquirirla. Pero no hay dicotomía potencial/actual, de corte aristotélico, pues las distribuciones (de posición, momento angular, etc.) son propiedades poseídas por el cuantón durante todo el tiempo. Más aún, son objetivas (independientes del sujeto) aun si un observador puede usar dispositivos experimentales reales para estrechar o ampliar esta o aquella distribución. Todo ello comporta, desde luego, el abandono de las probabilidades subjetivas y la adopción de modelos físicos del cálculo de probabilidades. En la axiomática cuántica propuesta por el autor se adopta una versión modificada (enteramente física) de la interpretación de la proprensión, de Popper. Según esta teoría, la probabilidad es una medida (no necesariamente un valor medido) de la disposición objetiva de una cosa para comportarse de determinada manera. Si uno desea evitar esta interpretación, entonces debe elaborar la MC como una teoría acerca de conjuntos de réplicas o copias de un objeto, esto es, como una estadística de Gibbs. Mas esto no se ha llevado aún a cabo. Mientras se explora esta alternativa, podemos pensar en variables dinámicas cuánticas como representando potencialidades objetivas.

Con esto basta para esbozar el quid de nuestra fundamentación axiomática objetivista de la MC.

3. Ver

Una primera ventaja de esta sistematización realista de la MC reside en que distingue el aspecto formal del semántico, esto es, la sintaxis cuántica de la semántica cuántica. El contenido físico se vierte en la teoría vía *hipótesis interpretativas* —no sólo reglas de designación sino suposiciones corregibles, y no "definiciones operacionales" sino hipótesis objetivas y libres del observador. Como cualquier otra teoría propiamente dicha, la MC contiene conceptos teóricos que carecen de interpretación empírica, esto es, que no pueden introducirse por medio de "definiciones operacionales". Más aún, ninguno de los símbolos básicos de la MC es empíricamente interpretable, por lo que la teoría carece de contenido empírico alguno: no describe ningún fragmento empírico. Ello no significa que la MC sea incontrastable: sólo significa que la teoría concierne a hechos transempíricos más bien que a fenómenos. En efecto, los microhechos a los que se refiere la MC básica, tales como saltos cuánticos, son imperceptibles. Las contrastaciones empíricas de la MC, como las de cualquier otra teoría, requieren la asistencia de teorías adicionales, teorías que vinculen microhechos con macrohechos y teorías que den cuenta del comportamiento de los macrosistemas (v. g., amplificadores) involucrados en las mediciones. En resumen, la MC es *físicamente significativa* porque se refiere a entidades y propiedades físicas (bien que en su mayor parte imperceptible). Y se convierte en *empíricamente contrastable* si se la enriquece con suposiciones específicas subsidiarias, datos experimentales, y teorías físicas adicionales —de lo contrario, continúa siendo incontrastable, lo que no habrían aceptado quienes suelen confundir significado y contrastabilidad.

Nuestro sistema de axiomas es a la par formal y semánticamente determinado. La interpretación del formalismo, según viene dada por los postulados interpretativos de la teoría, es, no obstante, esquemática más que completa. Así, cuando enunciamos que todo estado del microsistema se representa por un punto (o, más bien, un rayo) en un

cierto espacio (el espacio Hilbert del sistema), los términos "microsistema" y "estado" no se definen ni se describen –salvo por los postulados mismos. Estas palabras se han tomado de la jerga que se supone la profesión física domina. Estas y otras palabras figuran no sólo en la MC sino también en otros campos de la ciencia física, y su significado se especifica conjuntamente por todos los campos de investigación en que figuran. No es peculiar de la MC sino común a toda la ciencia factual: aquí carecemos de la posibilidad, característica de las matemáticas, de interpretar una teoría (v. g., la teoría de grupos) por otras teorías (v. g., la aritmética y la geometría).

Los axiomas semánticos o interpretativos de una teoría física aparean símbolos matemáticos con items físicos –entidades y propiedades. Los de la MC pueden leerse analógicamente en términos de partículas o campos –e incluso fluidos; y en algunos cásos pueden interpretarse de cualquier modo. Ello parece haber sugerido a los padres de la doctrina de Copenhague que hay dos interpretaciones complementarias igualmente verdaderas y mutuamente complementarias. En opinión del autor esto sólo muestra que ambas interpretaciones son *ad hoc*: dos interpretaciones diferentes de uno y el mismo formalismo constituyen dos teorías diferentes, y dos teorías diferentes pueden compararse entre sí pero no deberían mezclarse. Este argumento (*a*) se refuerza por la inexistencia de una axiomatización consistente de la MC en términos o bien corpusculares o bien ondulatorios, y (*b*) por el hecho de que todos los razonamientos usuales pueden realizarse dentro de nuestra versión de la MC sin emplear nunca los conceptos de partícula ni onda. En particular, el vector de estado no se interpreta como si describiera una intensidad de campo. Ni se lo interpreta como un campo de conocimiento. Es sólo fuente de propiedades físicas, como los potenciales y lagrangianos. Tras rechazar las analogías clásicas, la MC sufre una transformación similar a la sufrida por el electromagnetismo clásico cuando la relatividad especial mostró que ningún éter mecánico era posible como apoyo del campo electromagnético.

Al prescindirse de los conceptos clásicos de partícula (microcuerpo bien localizado) y onda (ola de un campo), evitamos la dualidad onda-corpúsculo y el famoso *"principio" de complementaridad*, piedra angular de la doctrina de Copenhague. En nuestra opinión, el cuantón no es ni partícula clásica ni campo clásico sino una entidad

sui generis que, en circunstancias extremas, se asemeja a un partícula y, en otras, a un campo. (Véase sección 2.) No importa que estas circunstancias sean naturales o controladas por el experimentador. En cualquier caso, los conceptos de partícula y onda, por legítimos que puedan ser en referencia a macrosistemas (cuerpos y campos a gran escala), deben considerarse sólo como metáforas a nivel cuántico —y, al igual que cualquier otra metáfora, como instrumentos de doble filo: heurísticamente valiosos a la par también que auxiliares equívocos. La eliminación de la dualidad partícula-onda y el "principio" asociado de complementariedad puede considerarse como una ventaja más de nuestra formulación de la MC, pues en nombre de la complementariedad se han defendido muchas incoherencias y oscuridades. (Más en el capítulo 6.)

Otro de los fantasmas que huyen es la *incertidumbre.* Si la MC no se refiere a nuestros estados mentales sino —¿adivínese a qué?— a fragmentos de materia y radiación, entonces las dispersiones que figuran en las relaciones de Heisenberg no han de interpretarse como incertidumbres subjetivas sino como latitudes objetivas en la localización del cuantón (Popper, 1959; Bunge, 1967a). Harto seguro, nuestra reformulación de la MC no elimina la incertidumbre: no se conquista la infalibilidad con sólo axiomatizar un campo de conocimiento. Únicamente, empujamos ahora el término "incertidumbre" hacia alguno de los metalenguajes de la MC, esto es, permitimos que figure en sentencias concernientes a nuestra habilidad en predecir hechos con la ayuda de la MC: no figura en el lenguaje objeto de la MC —ni tampoco debería figurar en ninguna otra teoría física. Cosa pareja sucede con *certidumbre.*

El término *indeterminación,* para nombrar la dispersión en torno al promedio, es ligeramente mejor que "incertidumbre" mas tampoco, por cierto, correcto en todo caso, pues nada hay indeterminado en una distribución de posiciones objetivas salvo que "indeterminado" se iguale con "ilegal y/o procedente de la nada" (Bunge, 1959a, 1962b, 1963). La MC es ciertamente estocástica y básicamente así, pero una teoría estocástica que implique leyes definidas concernientes a distribuciones de probabilidad no es indeterminista si no deja sitio para lo ilegal y/o creado de la nada. En resumen, nuestra versión de la MC es tan determinista como la mecánica clásica —sólo que no contem-

poriza con el determinismo laplaciano. Tampoco la doctrina ortodoxa es determinista: en efecto, si las probabilidades cuánticas son sólo grados de certidumbre, entonces nada puede inferirse de las cosas en sí. El indeterminismo ontológico requiere una interpretación física (objetiva) de la probabilidad. Mas tan pronto como las probabilidades son objetivas y legales, el indeterminismo se evapora quedando el determinismo estocástico.

Algo similar rige para otros términos epistemológicos, tales como "observador", "observable", y "conocimiento": no figuran en el lenguaje de nuestra teoría si bien pueden figurar en cualquier metalenguaje suyo —como cuando se dice que el conocimiento del estado en que un microsistema está nos permite computar su distribución de impulso y su posición promedio. De hecho, ésta es la interpretación empleada por el físico excepto cuando intenta adaptar la MC a la filosofía oficial de los físicos. Así, cuando caracteriza el vector de estado dice que, para cualquier microsistema en un medio determinado, ese símbolo representa una función espacio temporal, y agrega que la forma de la función puede variar cuando el microsistema y/o su medio cambian. En otras palabras, tanto en nuestra interpretación realista de la MC cuanto en el trabajo diario del físico, todo punto ψ en el estado de espacio es una función compleja definida sobre $\Sigma \times \bar{\Sigma} \times E^3 \times T$, donde "$\Sigma$" designa el conjunto de cuantones, "$\bar{\Sigma}$" el conjunto de entornos, "E^3" el espacio ordinario, y "T" la duración, representando la cruz el producto cartesiano. Algo similar sucede con los operadores que actúan sobre ψ : en ningún caso figura el observador como argumento.

4. Restauración de la objetividad

El sujeto figura, hemos dicho, en algunos de los *metalenguajes* de la teoría. Tomemos, v. g., una relación funcional F entre dos variables x e y, cada una de las cuales representa un rasgo de un sistema físico σ del tipo Σ. Dado que los rasgos relacionados por F son propiedades físicas de un σ, deben representarse por ciertas funciones en Σ. Denominémoslas g: $\Sigma \rightarrow X$ y h:$\Sigma \rightarrow y$, donde X es el conjunto de valores numéricos de g e Y el de h. Entonces la relación funcional entre las x y las y

es alguna función numérica $F:X \rightarrow Y$ con valores $y=F(x)$. Aunque los referentes σ no figuran explícitamente en la última expresión, ésta debe leerse en términos de aquéllos porque F se construye a partir de f y g. Debería interpretarse, por tanto, la fórmula "$y=F(x)$" como sigue: el conjunto X de valores numéricos de la propiedad g del sistema σ es aplicado por F al conjunto Y de valores numéricos de la propiedad h del mismo sistema. Ésta es una interpretación estrictamente física de la relación funcional dada. Pero la misma fórmula puede reinterpretarse en algún metalenguaje de la teoría en que figura. Por ejemplo, puede reinterpretarse en cualquiera de estos dos modos: (1) Dado F, para dodo x en X y todo y en Y, el *conocimiento* de x determina a y (en el sentido epistemológico, no ontológico de determinación). (2) Para todo x en X y todo y en Y, y es *hallado* (o *computado*) a partir de una *medición* adecuada de x mediante el uso de la fórmula: $y=F(x)$.

Las dos últimas interpretaciones pueden denominarse *epistemológicas* o *pragmáticas*. La segunda de ellas es más restrictiva que la primera, que no especifica el tipo de conocimiento implicado: puede ser experimental o, ciertamente, puede cubrir el caso de la postulación hipotética de los valores de x. Pero toda interpretación pragmática es más estrecha que la física por requerir la presencia de un sujeto cognoscente —que, ay, no se le encuentra por doquier ni está siempre disponible. La interpretación física es la más amplia y, sobre todo, forma la base o fundamento de las otras dos. En primer lugar, porque las interpretaciones epistemológicas pertenecen a un metalenguaje o lenguaje en el que figura "$y=F(x)$ —y no hay metalenguaje sin previo lenguaje objeto. En segundo lugar, porque a menos de estar dispuestos a abrazar el solipsismo —esto es, a creer que el mundo es aquello que nos interesa que sea— debemos suponer que nuestro conocimiento es verdadero en la medida en que modeliza cosas, relaciones y acaecimientos reales: si el conocimiento de x únicamente determina y vía F, debe ser porque X e Y están, de hecho, relacionadas por F —esto es, porque Y es la imagen de X bajo F, sepámoslo o no.

El ideal de *objetividad*, característico de la ciencia factual, es compartido entonces tanto por la MC como por la física clásica. El objeto no ha desaparecido ni queda soldado al sujeto. Lo que ha sucedido es que nuestra habitual imagen de los microobjetos es extremadamente

sofisticada. Y los items que se sueldan no son el sujeto y el objeto sino el sujeto y su reconstrucción conceptual del objeto —pero esto, salvo para los platónicos, siempre ha sido así. El sujeto no figura entre los predicados básicos de nuestra versión de la MC. Tampoco figura en la teoría de la medición, y ello porque la teoría física se desinteresa de los sucesos psíquicos que acaecen en el interior del cráneo del observador: una teoría física de la medición se ocupa sólo de la intersección física entre dos o más entidades físicas, una de las cuales al menos debe ser un macrosistema.

En verdad, en la versión usual de la MC, la intervención del observador produce una repentina contracción del estado cuántico, que llega a proyectarse sobre un estado propio del operador que representa al "observable" que se está midiendo. Es más, este colapso es manifiestamente ilegal y, por consiguiente, impredictible, porque no hay relación legal entre el estado original y el final. Pero este postulado conduce a incoherencias —para empezar, es incompatible con la ecuación de Schrödinger (von Neumann, 1932)— y no se incluye, por consiguiente, en nuestra formulación de la MC. Además, este postulado de proyección, que asevera el colapso de la "función de onda" a la vista del Observador, implica el colapso del principio de legalidad, presuposición ontológica básica de la investigación científica (Bunge, 1967c).

La teoría cuántica de la medida debería entenderse como una aplicación de la MC básica al caso particular en que el cuantón se aparea con un instrumento inestable capaz de amplificar los microhechos de interés. Desdichadamente, no se dispone de tal teoría salvo en estado embrionario, principalmente porque la mayoría de los físicos siguen al matemático von Neumann (von Neumann, 1932) en la creencia de que hay dispositivos universales de medida, esto es, instrumentos capaces de medir cualquier cosa, de suerte que su acción pueda ser representada por un solo concepto simple —el operador de proyección. Pero, dejando a un lado toda consideración técnica, el filósofo es competente para criticar la tesis positivista de que la MC se basa en un análisis del proceso de medición a la vez que la presunción más extrema de que toda la MC se refiere a mediciones. Estas tesis son falsas por las siguientes razones: (*a*) ninguna medición puede planearse e interpretarse sin la asistencia de teorías; (*b*) las mediciones implican macroprocesos, mientras que la MC básica se refiere a microeventos;

(*c*) por estas razones, la teoría cuántica de la medida, en la medida en que existe, es una aplicación de la MC básica; (*d*) consecuentemente, todo enunciado cuántico que concierna a la medición, debe figurar como enunciado derivado, no como axioma de la teoría cuántica.

Una última ventaja de nuestra versión de la MC es que pone en relieve la futilidad de la sedicente *lógica cuántica* de Birkhoff y von Neumann (1936), Destouches-Février (1951), y otros. La razón por la que se aboga por este exótico cálculo lógico es ésta. Si la MC es verdadera, entonces las proposiciones "El cuantón *x* está en el punto *y* en el instante *t*" y "El cuantón *x* se mueve con la velocidad *v* en el instante *t*" son mutuamente incompatibles, como lo muestran las relaciones de latitud de Heisenberg. Parece, por tanto, como si la MC incorporara un cálculo lógico que impide la conjunción de ciertos enunciados ("no conmensurables"). Pero este argumento proviene de considerar los cuantones como partículas clásicas. La dificultad no se presenta si los cuantones se imaginan como carentes, en general, tanto de posición y velocidad fijas, sino como poseyendo en su lugar distribuciones de posición e impulso (véase la sección 2). Ello basta para disipar el nubarrón adicional de la lógica cuántica. Mas no es necesario: las proposiciones incompatibles aparecen por doquier, y la lógica ordinaria (el cálculo bivalente de predicados) es suficiente para manejar tales situaciones. Si la conjunción de dos proposiciones es falsa debemos abstenernos de afirmarla. Es más, cuando se axiomatiza la MC se presuponen ciertas teorías matemáticas, que incorporan en sí la lógica clásica. Consecuentemente, aceptar la lógica clásica a nivel sólo de fundamentos para rechazarla a nivel de teoremas, es caer en contradicción.

Pero es hora ya de concluir.

5. Conclusión

La MC, una de las teorías más ricas y profundas, se ha visto oscurecida desde su nacimiento, hace cuarenta años, por una epistemología subjetivista que proviene de Berkeley y Mach. Este lastre filosófico se encuentra no sólo en montones de metaenunciados de moda relativos a la MC sino también en muchos enunciados objeto de la

versión standard de la teoría. Como resultado, los referentes de la versión standard de la MC se convirtieron —parafraseando el dictum berkeleyano de los infinitesimales vacilantes de Newton— en los fantasmas de entes físicos difuntos.

Se ha proclamado a menudo, con envidiable convicción, que el maridaje de la MC con el subjetivismo y, particularmente, el positivismo, es indisoluble. Esta creencia ha llevado a algunos a rechazar completamente la MC, a otros a proponer una remodelación de la MC al estilo clásico, y a la mayoría a vivir en medio de la bruma, con fortaleza o con alegría. Mientras tanto, los físicos, han extendido, aplicado y contrastado con éxito la teoría básica, procediendo en su trabajo diario sin prestar atención al lastre filosófico. Este mero hecho debería haber sugerido que la unión de la MC y la epistemología subjetivista era un *mariage de convenance* merced al cual el positivismo reforzaba su prestigio en tanto que la nueva ciencia, recibida inicialmente con escrúpulos por su divergencia respecto a la física clásica, gozaba del apoyo de una filosofía de moda entre los científicos.

El matrimonio se ha convertido ahora en *mésalliance* y debe disolverse. En efecto, (*a*) la epistemología subjetivista desposada por el positivismo lógico está ahora muerta o casi de resultas tanto de la crítica externa cuanto de la honesta autocrítica ejercida por los mismos positivistas; (*b*) es posible eliminar el lastre subjetivista que abruma a la MC, convirtiendo a ésta en una teoría enteramente física libre de elementos psicológicos. Al hacer tal, la MC no se ha quedado soltera sino que ha contraído nuevas nupcias filosóficas: el realismo. Por supuesto, no el realismo acrítico, sino un realismo que, a la vez que postula la existencia autónoma del mundo externo, está dispuesto a corregir toda reconstrucción conceptual suya —un realismo que reconoce que aun cuando intentemos cartografiar la realidad lo hacemos de modo fragmentario, imperfecto y simbólico más que completa y literalmente. (Recuérdese el cap. 4, sec. 4.)

Esto, lejos de producir complacencia en el campo realista, debería ponerle en acción: dado que la MC no es ya la prueba de que el realismo es insostenible, lo que ello nos sugiere es el subdesarrollo en que se encuentran las variedades existentes de realismo al no ofrecer una descripción y análisis detallados de los modos sofisticados como procede la investigación científica para inventar y contrastar modelos

conceptuales de trozos de realidad. El metafísico debería sentir un reto similar. Hasta ahora se le había dicho que la MC prueba que la materia es más parecida a la mente que a la materia, sintiéndose según los casos desconcertado o encantado. Debería advertir ahora que la materia no ha sido desmaterializada por la MC (Feigl, 1962) sino que la imagen que la física dibuja de ella es mucho más compleja de lo que la mecánica clásica y las teorías clásicas de campo habían supuesto: los cuantones son cosas proteicas que no pueden dibujarse en términos clásicos. Mas, en cualquier caso, ahí están, a la puerta de la ontología, solicitando una nueva ojeada a ciertas categorías ontológicas básicas tales como las de substancia, forma, movimiento, causación, azar y ley. Ojalá la nueva física, una vez limpia de una filosofía obsoleta, estimule nuevos desarrollos en la epistemología y la ontología. (Para sugerencia en esta dirección, véase Bunge, 1972 a.) y ojalá la nueva filosofía ayude al progreso científico en lugar de obstaculizarlo. Una contribución susceptible de realizarse es espigar el grano teórico de entre la broza heurística —como se mostrará en el próximo capítulo.

Capítulo 6

ANALOGÍA Y COMPLEMENTARIDAD*

La analogía es, indudablemente, tan prolífica como tramposa. Puede cumplir esencialmente tres propósitos útiles. *Uso heurístico*: clasificar, generalizar, encontrar nuevas leyes, construir nuevas teorías, e interpretar nuevas fórmulas. *Uso computacional*: resolver problemas computacionales mediante el manejo de análogos (v. g., modelos eléctricos de sistemas mecánicos). *Uso experimental*: resolver problemas de contrastación empírica mediante el manejo de análogos, particularmente réplicas y simulados (v. g., análisis experimental de la tensión en cuerpos de acero sobre réplicas de plástico transparente). Enfocaremos aquí nuestra atención en la primera función de la analogía, según se la encuentra en la teoría cuántica.

La aserción de que el vector de estado de un microsistema representa una onda real (la interpretación original de Broglie-Schrödinger) se originó en la analogía formal entre la ecuación de estado cuántica y las ecuaciones de onda clásicas: fue una inferencia analógica basada en una analogía de tipo formal. (Para elucidaciones de los conceptos de analogía formal y analogía substancial, véase Metzger, 1926; Bunge, 1967c, 1967f, y 1972a.) En los días iniciales de la teoría, esta interpretación se tomó de modo literal, no metafórico, esto es, la analogía formal se consideró indicativa de una analogía substancial. Poco tiempo después, al proponer su interpretación estocástica, Born mostró tácitamente que ninguna similitud substancial había de concluirse de la analogía formal: que el vector de estado no representa una subs-

* Algunos parágrafos se reproducen de Bunge (1967f) con permiso del compilador y editor.

tancia peculiar que se difunda por el espacio accesible al sistema sino que representa el estado del sistema. Concedido, sin la analogía la mecánica ondulatoria no habría nacido y la llamada difracción de la materia no habría contado como confirmación empírica decisiva de la misma. Pero la supervivencia de esta interpretación junto con la interpretación estocástica (a su vez revestida de lenguaje corpuscular) es responsable de muchas de las dificultades conceptuales (no computacionales y no empíricas) de la teoría cuántica. Vamos a mostrarlo en lo que sigue.

1. El doble filo de la analogía

No hay duda de que la analogía puede ser fructífera en la exploración preliminar de nuevos territorios científicos, al sugerir que lo nuevo y desconocido es, en algunos respectos, como lo viejo y conocido. Si *B* se comporta como *A* en ciertos respectos, entonces vale la pena conjeturar que así lo hace en otros respectos también. Sea o no que la hipótesis triunfe, algo habremos aprendido, mientras que nada se habría logrado de no formular hipótesis alguna. Si una hipótesis analógica pasa las pruebas, conoceremos entonces que *A* y *B* son efectivamente similares bien substancial bien formalmente. Y si la analogía fracasa totalmente, constataremos que se requieren algunas ideas radicalmente nuevas, pues *B* es, en algunos respectos, radicalmente diferente de *A*. Pero salvo que la analogía sea extremadamente específica o detallada, es posible que en una primera aproximación valga, pues, después de todo, nuestro avío conceptual es limitado y nunca dos sistemas concretos son disímiles en todo respecto. La cuestión es decidir qué acentuar en una fase determinada de la investigación, esto es, si el parecido o la diferencia.

El tratamiento elemental de la dispersión de la luz por electrones (efecto Compton) es un ejemplo típico del triunfo inicial y fracaso final de la analogía como método para enfrentar problemas nuevos. Fingiendo que tanto el electrón como el fotón son partículas (suposición ausente en el tratamiento avanzado), el problema puede reducirse a una colisión elástica de dos cuerpos pudiendo obtenerse así la fórmula para el cambio de frecuencia de la radiación de difusión —en la medida en que se desee tolerar una frecuencia que es incomprensi-

ble en el contexto de la mecánica. Esto es, si restringimos nuestra atención a los intercambios de impulso y despreciamos todas las cuestiones restantes, entonces la analogía fotón-balón —que, aunque desconcertante, es, a la par, substancial y formal— resulta fértil. Pero se quiebra tan pronto como se formulan cuestiones adicionales, algunas de las cuales recibirán respuestas erróneas sugeridas por la analogía, mientras que otras no recibirán respuesta en absoluto pues no son cuestiones que cubra la analogía. Así, la analogía sugerirá la pregunta relativa a qué es la masa de fotón, cuya respuesta errónea es que debe ser $h\nu/c^2$ puesto que su momento vale $h\nu/c$ y su velocidad c. Esto carece de sentido pues no hay masa relativa sin masa en reposo, y no hay masa en reposo sin un marco en reposo —por no mencionar la inexistencia de ecuaciones de movimiento para el fotón. En cambio, la analogía mecánica no nos ayudará a computar la sección eficaz de dispersión, que requiere la consideración de algunas de las propiedades electromagnéticas y cuánticas del electrón y del fotón.

La analogía, pues, es un arma de doble filo. De un lado, facilita la exploración de lo desconocido al estimularnos a extender tentativamente a un nuevo campo nuestro conocimiento antecedente. De otro lado, si el mundo es variado, entonces la analogía exhibirá su limitación en algún punto, pues radicalmente nuevo es aquello de lo que no puede darse plena cuenta en términos familiares. Tal parece ser lo acontecido con las analogías que ayudaron a construir las teorías cuánticas, particularmente las analogías de la partícula y la onda: ahora, parece que pasó ya el tiempo de sus frutos. Sin duda, en el comienzo fue ciertamente humano buscar inspiración en la física clásica, presumiendo que electrones y fotones se comportaban en ocasiones como partículas y en otras como campos: no se disponía de otra ayuda que de la analogía para asignar a la mecánica ondulatoria y a la mecánica matricial (y, posteriormente, a la electrodinámica cuántica también) algún significado físico. Pero, mientras tanto, deberíamos haber aprendido al menos dos lecciones. La primera, que las analogías de la partícula y la onda son débiles y, sobre todo, mutuamente incompatibles. La segunda, que los entes a los que se refieren las teorías cuánticas se comportan de modo original, esto es, según leyes no clásicas —por lo que no pueden ser ni cuerpos clásicos ni campos clásicos. Es hora ya, por consiguiente, de reconocer que las teorías cuán-

ticas deberían desembarazarse de aquellos análogos clásicos y reconocer que se ocupan de cosas *sui generis* que merecen un nuevo nombre genérico —digamos, *cuantones* (Bunge, 1967a).

2. LA DUALIDAD ONDA-PARTÍCULA EN ÓPTICA

Varias teorías ondulatorias de la luz han reinado en óptica desde los tiempos de Young, Fresnel y Cauchy hasta el nacimiento de la hipótesis del fotón en 1905. Desde entonces, hasta la creación de la electrodinámica cuántica en 1927, dos cuerpos de ideas mutuamente incoherentes solían dar cuenta de los hechos ópticos: la teoría de campo de Maxwell, y un conjunto de hipótesis (más que un sistema hipotético-deductivo) que se centraba en torno a la hipótesis del fotón. La naturaleza de la luz se consideró dual y esta dualidad se consideró, a menudo, irreductible.

La electrodinámica cuántica (de ahora en adelante EDC) se construyó con el propósito de incorporar la dualidad partícula-onda a un cuerpo consistente de ideas, superando así el maniqueísmo del período previo. Aún se cree corrientemente que la EDC triunfó en la incorporación de esa dualidad, principalmente porque la teoría asigna al fotón, a la vez, un impulso lineal y un impulso angular (o, más bien, análogos cuánticos de los mismos). Mas, por supuesto, con ello no se establece que la EDC considere el fotón como partícula. En primer lugar, porque la EDC niega las dos propiedades definidoras, a saber, localización precisa —por tanto, trayectoria definida— y masa. En segundo lugar, como consecuencia, por no contener la EDC ecuación de movimiento propiamente dicha: todas sus ecuaciones básicas, incluyendo sus relaciones de conmutación, son ecuaciones de campo, ninguna de las cuales incluye trayectorias del fotón en el espacio ordinario. (Cierto es, toda fórmula relativa a la velocidad de cambio de una variable dinámica se denomina "ecuación de movimiento", mas esto no es sino una metáfora, pues no es menester que haya movimiento alguno implicado.) En tercer lugar, porque las propiedades que la EDC asigna al campo de radiación son propiedades no mecánicas —v. g., los componentes eléctrico y magnético, las fases, y la independencia, respecto del marco de referencia, de la velocidad de propagación del campo.

En rigor, la EDC ha permanecido más cerca de la teoría de campo de Maxwell que de la mecánica: después de todo, es, esencialmente, su cuantización. Las propiedades cuánticas del campo no deberían confundirse con sus propiedades mecánicas o corpusculares. Así, el hecho de que el impulso del fotón pueda agregarse al impulso mecánico de un trozo de materia, para obtener una cantidad conservada, no prueba la naturaleza mecánica de la materia; asimismo, la posibilidad de agregar energías de diferentes clases no prueba su identidad con el trabajo mecánico. Todo lo que muestra es que el cuadrivector impulso-energía, a diferencia de la masa y la carga, es una propiedad no específica, esto es, una propiedad característica de todo sistema físico conocido hasta la fecha. Asimismo, el hecho de que la energía del campo pueda descomponerse en la energía de los osciladores de radiación no prueba que el campo sea un sistema mecánico sino más bien que el formalismo hamiltoniano no se compromete, prestándose a analogías mecánicas que, en ocasiones, son engañosas (Bunge, 1957). Si formulamos teorías diferentes en uno y el mismo marco matemático —v. g., la "dinámica" hamiltoniana— entonces no podemos menos que producir analogías formales. Mas en tal caso no deberíamos hipostasiar esa similitud matemática concluyendo que la madre Naturaleza es toda mecánica (o toda electromagnética).

En resumen, la dualidad onda-partícula, que había roto la unidad de la teoría electromagnética en 1905, estimuló la creación de otra teoría, la EDC, que eliminó esa dualidad. Incluso en sus versiones más sofisticadas, la EDC es una teoría de campo que no contiene hipótesis alguna acerca de la naturaleza corpuscular de los fotones. La dualidad óptica es, pues, una reliquia del interregno de 1905-1927, un residuo que sirve básicamente para equivocar a los estudiantes en la creencia de que la luz es, al mismo tiempo, ondulatoria y no-ondulatoria o, aún peor, que está tan vacía de carácter que parecerá lo que decida el observador omnipotente.

3. La dualidad onda-partícula en la mecánica cuántica

La dualidad onda-partícula sugirió a de Broglie el problema de si la materia no exhibiría una dualidad similar. Si el campo electromag-

nético parecía tener un lado mecánico, ello sólo era posible si la materia tenía a su vez un aspecto tipo campo. "La idea de semejante simetría fue el punto de partida de la mecánica ondulatoria" (de Broglie, 1937, p. 171. Véase también Schrödinger, 1926, p. 489). Que la analogía fuese extraordinariamente fructífera no prueba que fuese substancial más bien que formal.

Fue afortunado que de Broglie y Schrödinger no llegaran a advertir que los formalismos de Hamilton y Hamilton-Jacobi son suficientemente generosos para albergar casi cualquier teoría física, desde la mecánica hasta la termodinámica. De haberlo sabido no se habrían maravillado de la analogía entre el principio óptico de Fermat y el principio mecánico de Hamilton y no habrían, por consiguiente, inventado la mecánica ondulatoria. Hubiésemos tenido que luchar con la menos pictórica mecánica matricial y habríamos prescindido del error de creer que la mecánica cuántica se ocupa de ondas de un cierto tipo (ondas materiales).

Hemos llegado a reconocer la originalidad de la mecánica cuántica (en adelante MC) porque la teoría puede formularse sin recurrir a la heurística de Broglie y Schrödinger. Es más, si bien es cierto que cuando se trabaja dentro de esta formulación (la "imagen" de Schrödinger), se usan expresiones como "función de ondas", "paquete de ondas", "longitud de ondas", y "ecuación de ondas", tales expresiones tienden a ser consideradas como análogos clásicos unilaterales. La propia frase "la onda de Broglie asociada a un electrón" muestra que no creemos ya que los electrones *sean* ondas: en su lugar tendemos a pensar en el vector de estado como propiedad global y básica de un sistema físico antes que como cosa o propiedad específica tipo masa. Tampoco creemos que las presuntas partículas elementales sean meros corpúsculos. La tendencia es considerarlas como entidades extrañas que poseen a la par propiedades corpusculares y ondulatorias, que se acentúan alternativamente o se manifiestan en diferentes ocasiones. Criticaremos la última creencia por ser analógica, mas antes de hacerlo debemos recordar cuáles fueron sus fundamentos: los físicos pueden ser obstinados pero rara vez son caprichosos.

Hay dos argumentos en favor de la dualidad partícula-onda de la materia: uno se basa en un conjunto de experimentos, el otro en un conjunto de fórmulas. Los experimentos que implican motas de mate-

ria y que se invocan en favor del dualismo, son a su vez de dos tipos: aquellos en los que parecen surgir a luz propiedades corpusculares (v. g., huellas de protones en una placa fotográfica) y aquellos en los que son prominentes las propiedades tipo onda (v. g., la dispersión de electrones por una formación regular de átomos). Pero esto apenas prueba nada salvo la naturaleza de los microsistemas de que nos ocupamos, pues los dispositivos experimentales son macrofísicos y los resultados experimentales se describen en términos clásicos —en términos de partículas y ondas. Todo lo que esto muestra es que podemos usar ideas clásicas cuando se llega al macronivel. Mas esto hace tiempo que lo sabíamos. (Más sobre el asunto en la sección 5.)

En cambio, la interpretación usual o de Copenhague de la MC está en lo cierto al acentuar que el "aspecto onda" y el "aspecto partícula" dependen del dispositivo experimental. Así, un electrón no exhibirá el mismo comportamiento cuando se lo lanza sobre una red de difracción que cuando se lo sumerge en un campo de rayos X. En resumen, la *semejanza* de un cuantón bien sea con una partícula (entidad clásica) bien con una ondulación de campo (entidad clásica) puede controlarse experimentalmente —o, como los devotos de Copenhague dicen de modo equívoco, depende del "observador". Dicho de manera diferente: el cuantón, ese objeto proteico, cuando es influido por un macrosistema (v. g., un dispositivo experimental) puede ser moldeado bien como (pseudo) partícula, bien como (pseudo) onda, según sean sus interacciones con ese macrosistema. (Innecesario decir, éste es un sistema físico y no psicofísico y, sobre todo, no necesita ser un artefacto: hay redes y otros filtros en la naturaleza.) Pero, desde luego, la semejanza no prueba la identidad.

La escuela de Copenhague está en lo cierto también al suponer que el cuantón individual por sí no tiene ni aspecto corpuscular ni ondulatorio, sino que el sistema compuesto macrosistema-cuantón ("sistema-observador" en la equívoca terminología usual) puede adquirir cualquier aspecto, en cualquier grado, según sea la naturaleza del macrosistema (según la "decisión del observador" en la interpretación antropocéntrica de la escuela). Por consiguiente, si se persiste en usar imágenes clásicas, se ve uno obligado a desembocar en el dualismo y a denegar al cuantón existencia autónoma. En resumen, el dualismo y el subjetivismo no son sólo credos filosóficos heredados de la

escuela de Copenhague: son también consecuencias del *clasicismo* —de un modo analógico de pensar.

Afortunadamente hay mediciones, tales como las espectroscópicas, que no conciernen a un cuantón oprimido por un macrosistema sino a cuantones en el espacio libre. Los resultados de estas mediciones confirman la MC y la EDC en un buen grado. Dado que estas teorías pueden formularse sin usar nunca los conceptos de partícula y onda, salvo analógicamente, esos resultados empíricos sugieren que el "aspecto partícula" y el "aspecto onda" dependen del instrumento (no del observador o subjetivos) y, por consiguiente, no son indicativos de lo que el cuantón libre realmente es. En otras palabras, por paradójico que pueda parecer, el experimento por sí solo es incapaz de probar o refutar la naturaleza dual de los cuantones, particularmente si sus resultados se describen en lenguaje clásico. A fin de averiguar si las teorías cuánticas sostienen el dualismo, debemos analizar las teorías mismas. Si la teorías son de hecho dualistas además de verdaderas, entonces el dualismo se mantendrá —de lo contrario se rechazará.

4. El dualismo: incoherente y ad hoc

Para descubrir si el dualismo está embutido en la teoría cuántica debemos analizar las fórmulas de la MC y la EDC en lugar de comentarios sobre ellas —y no sólo algunas fórmulas elegidas convenientemente, sino las básicas, esto es, los axiomas de estas teorías. Desgraciadamente, rara vez se hace esto: el procedimiento usual consiste precisamente en elegir aquellas fórmulas que parecen confirmar el credo dualista, como si ello garantizara la interpretación dualista de todas las restantes fórmulas de la teoría. En cualquier caso, las principales fórmulas usualmente invocadas en apoyo del dualismo son las de la igualdad de Broglie "$p\lambda = h$" y la desigualdad de Heisenberg "$\Delta x \cdot \Delta p \geqslant h/4\pi$". No obstante, la p en la primera fórmula es una variable clásica (un número-c) y λ no es, en general, la longitud de onda de una onda plana en el espacio ordinario. Y la interpretación dualista de la segunda fórmula es inconsistente con la interpretación estocástica del vector de estado, que entraña que "Δx" (y asimismo "Δp") designa la desviación standard o dispersión estadística en torno al valor

medio, concepto estocástico que no tiene nada que hacer con tamaños de paquetes de ondas, aperturas de ranuras en dispositivos de difracción y otros puntos de la interpretación dualista (Landé, 1965; Bunge, 1967a).

Con todo, el manual standard no hará esfuerzos para compaginar las fórmulas precedentes con la interpretación estocástica de Born, a la que contradicen. En particular, oscilará entre estas interpretaciones mutuamente incompatibles de "Δx" y "Δp": la indeterminación de la posición (impulso) de la *partícula*, el ancho espacial (espectral) del paquete de *ondas* asociado con la *partícula*, el tamaño de la perturbación ocasionada por el aparato en la posición (impulso) de la *partícula*, y nuestra incertidumbre subjetiva concerniente a la posición (impulso) de la partícula difractada (a modo de *onda*) a través de una ranura. Rara vez se advierte que este errático comportamiento es inconsistente y, por consiguiente, acientífico. Tampoco se apunta usualmente que cada una de estas interpretaciones es *ad hoc*, en el sentido de ser impuesta arbitrariamente sobre los símbolos sin autorización alguna para ello. En efecto, en primer lugar, los postulados de la MC no enuncian que los cuantones sean partículas —ni enuncian que sean fragmentos de campo. Y, en segundo lugar, jamás se han hecho suposiciones relativas sea a un aparato, sea a un observador con objeto de derivar las relaciones de Heisenberg de los postulados de la MC, por lo que es lógicamente impermisible mencionarlos en modo alguno a nivel de la teoría general: hacerlo es incurrir en una inconsistencia semántica. (Recuérdese el capítulo 5, sección 1.)

En otras ocasiones, se enuncia que la MC consiste de dos teorías mutuamente equivalentes, una de ellas formulada en el lenguaje corpuscular, la otra en el lenguaje ondulatorio. Esto también es un error. Hay muchas, no sólo dos, formulaciones diferentes de la MC y la mayoría de ellas son matemáticamente isomórficas —lo que no entraña que se les asigne el mismo significado. Una de estas formulaciones es de Schrödinger, en términos de un vector de estado dependiente del tiempo; otra es la "imagen" de Heinseberg, en términos de variables dinámicas dependientes del tiempo. Formulaciones adicionales son la matriz de densidad y la integral de camino. Son formulaciones equivalentes de una y la misma teoría y no son imágenes sino construcciones simbólicas de alto nivel. La formulación de Schrödinger sugiere

analogías con las teorías de campo clásicas; las formulaciones de Heisenberg y Feynmann invitan a analogías con la mecánica de partículas clásica; y la formulación de la matriz de densidad sugiere, en todo caso, analogías con la mecánica estadística clásica. *Pace* Dirac (1972) no hay mejor "imagen" (la de Heisenberg) para "comprender" la MC. Y ninguna de estas interpretaciones puede llevarse lejos consistentemente: estas analogías son formales, conciernen a algunas similitudes de forma entre algunas, no todas, las fórmulas cuánticas, y ciertas fórmulas clásicas. Más aún, estas analogías no pueden traspasarse a la EDC.

En resumen, la analogía óptico-mecánica, que parecía ser una fértil hipótesis de trabajo, debería abandonarse en la actualidad pues ha sobrevivido a su propósito, convirtiéndose en fuente de confusión.

5. Nacimiento y caída de la complementaridad

A mediados de los veinte, los físicos más avanzados creyeron tener que apechugar con dos dualidades: la alegada naturaleza dual del campo electromagnético y la posible dualidad de la materia. Partiendo de esta doble dualidad no quedaba sino un corto trecho para llegar a la conjetura ontológica general de que todo ente físico posee a la vez aspectos corpusculares y ondulatorios. Ésta es la tesis del *dualismo general*; es una hipótesis metafísica pues concierne a la naturaleza básica de todo existente. Cuando se construyó la MC, las relaciones de dispersión ("incertidumbre") de Heisenberg se interpretaron a la luz del dualismo; se convirtieron en un ejemplo preciso y llamativo de dualismo. El *principio de complementaridad* de Bohr —que, como el principio de Mach y la doctrina Monroe, nunca se enunció sin ambigüedad, ni se entendió claramente— fue una especificación a la vez que reinterpretación de dualismo general. Fue una especificación o particularización pues, además de enunciar la dualidad, aseveró que cuanto más se resaltaba uno de los dos aspectos tanto más se borraba su complemento: a más *yin* menos *yang* recíprocamente.

Mas, a diferencia de la tesis ontológica del dualismo general, el principio de complementaridad alegaba referirse al complejo sujeto-objeto más que a microsistemas existentes autónomamente. En efec-

to, las formulaciones ortodoxas del principio no aseveran que los rasgos corpusculares y ondulatorios se equilibren entre sí. En su lugar, enuncian que lo que puede ser complementario es o un par de dispositivos macroscópicos experimentales (incluido el observador) o un par de descripciones de los resultados de las operaciones llevadas a cabo con la ayuda de tales dispositivos de laboratorio, o, finalmente, un par de conceptos. La complementaridad, en resumen, fortalece el dualismo haciéndolo un poco más preciso —aunque no lo suficientemente preciso— pero, por otra parte, debilita la dualidad al dejar de atribuirla a la naturaleza: las cosas en sí, v. g., los átomos en el espacio libre, no poseen naturaleza dual —más aún, serían sólo ficciones de una imaginación no disciplinada por la filosofía de Copenhague centrada en el sujeto.

Es más, puesto que los dispositivos experimentales y sus resultados se supone que son descriptibles clásicamente, el principio de complementaridad permanece más acá de la MC y la EDC: estrictamente, no es un enunciado cuántico en la medida en que no concierne a microsistemas. Si se lo considera como principio, bien de la MC o bien de la EDC, entonces entra en contradicción con la aserción de que los microsistemas satisfacen leyes no clásicas y debe, por consiguiente, describirse y explicarse en términos no clásicos. Pero, hablando estrictamente, el principio de complementaridad no es un principio, pues no implica nada. En efecto, ningún teorema se sigue de él. A fin de probar un teorema en la teoría cuántica, uno tramita un manojo de axiomas habitualmente en conjunción con un conjunto de hipótesis específicas concernientes a, digamos, el número de microsistemas y sus acciones mutuas —en resumen, se agrega un modelo preciso a las suposiciones generales: véase la sección 8— pero no se usa el principio de complementaridad, que es demasiado vasto y vago para poder implicar algo. (En particular, este pseudoprincipio no encuentra aplicación en la EDC, pues las dispersiones cuadráticas medias de las componentes del campo electromagnético desafían una interpretación corpuscular.) El pseudoprincipio de complementaridad no es, pues, ni principio ni teorema —ni tampoco tan general como usualmente se alega, pues no rige para otros campos. Y en la teoría cuántica avanzada de "partículas" (segunda cuantización) el campo se trata como la cosa primordial. Así, en el caso de electrones, o de mesones, el campo

de materia se considera como la entidad primaria mientras que las "partículas", o, más bien, las entidades tipo partícula, son sólo cuantos de campo, esto es, pedazos de campo. (Un valor propio del operador del número de ocupación representa el número de entes en un determinado estado, y estos entes —los cuantos de campo— no son partículas clásicas.) En otras palabras, cualquier teoría hipercuantizada se halla más próxima de una teoría de campo clásica que de la mecánica clásica, aun si puede ser formulada dentro del marco hamiltoniano o lagrangiano. Consecuentemente, no hay cabida para la complementaridad en las áreas más sofisticadas de la teoría cuántica. Ni lo hay, *a fortiori*, en ninguna de las teorías fenomenológicas —tales como el formalismo de la matriz de dispersión— que rehúyen una descripción detallada del campo.

¿Qué es, pues, lo que, aparte de la autoridad, explica la supervivencia de la complementaridad? La razón principal parece residir en su gran utilidad. En efecto, la complementaridad explica muchas dificultades y da cuenta de experimentos de dos tipos: experimentos mentales que jamás se llevaron a cabo y experimentos reales jamás computados en términos cuánticos. El primer punto es obvio: una vez que se acepta el pseudoprincipio, puede usárselo para consagrar oscuridades e inconsistencias, tal como el misterio de la trinidad subsume otros misterios menores. En cuanto a los experimentos que se afirma ilustran el principio, son, de hecho, o imaginarios o todavía se encuentran fuera del alcance de la teoría. Entre los primeros se encuentran el microscopio de rayos gamma de Heisenberg y el experimento de la pantalla de Bohr en su discusión con Einstein. Puesto que no tienen poder confirmatorio podemos dejarlos de lado. Entre los experimentos del segundo tipo, resaltan los experimentos de difracción. Desafortunadamente, la difracción por una única ranura ha sido calculada sólo para una ranura infinitamente larga y una onda monocromática de Broglie. Más aún, la computación disponible es aproximada y sus resultados están en contradicción con las desigualdades de Heisenberg (Beck y Nussenzveig, 1958) —no pudiendo, desde luego, sostenerse frente a éstas. *A fortiori* el muy discutido experimento de las dos ranuras nunca ha sido computado exactamente en la MC, menos aún en la EDC. Tanto más cuanto que las más completas, exactas y recientes 681 páginas del largo trabajo sobre la dispersión de Newton

(1966) no se ocupan del experimento mental de la difracción standard que se encuentra en las discusiones sobre la teoría cuántica. (De otro lado, y harto curiosamente, cabe explicarlo de modo puramente corpuscular con la ayuda de la teoría cuántica clásica, como efecto de la periodicidad de la red de dispersión [Landé, 1965].) En verdad, en las discusiones cualitativas de estos experimentos se usan unas cuantas fórmulas, pero se toman de la teoría general: no resultan de su aplicación a esas circunstancias especiales. Se muestran, también, algunas figuras de difracción, pero se toman de experimentos reales (si bien hasta hoy no calculados) o se adoptan de la óptica clásica. En resumen, las discusiones de estos experimentos en términos de complementaridad son verbales y analógicas. Consecuentemente, la complementaridad no es parte de la teoría cuántica.

En conclusión, la complementaridad, por razonable que pareciese en los días iniciales de la teoría cuántica, cuando la gente pensaba en términos de imágenes clásicas, ha agotado ahora toda la potencia que pudo haber tenido: se ha convertido en excusa para la oscuridad y la incoherencia.

6. Hacia una interpretación literal de la teoría cuántica

Varios físicos han notado que los conceptos de onda y partícula no pertenecen a la MC porque son metáforas clásicas. Así, Schrödinger sostuvo en cierta ocasión que onda y partícula son "imágenes que nos vemos obligados a mantener porque no sabemos cómo zafarnos de ellas" (Schrödinger, 1933, p. XIV). La impresión de ser sólo metáforas, imágenes o apoyaturas visuales, viene reforzada por el hecho de que dejan de figurar en cualquier intento cuidadoso de formular la MC de modo ordenado, esto es, axiomáticamente. En efecto, no figuran ni como conceptos indefinidos ni como definidos; por lo que no habría que tolerar que figuraran tampoco en los teoremas. La razón principal por la que todavía estos análogos clásicos aún juegan un importante papel en las discusiones sobre fundamentos de la MC e incluso la EDC parecen ser la inercia y el espíritu de partido.

Aunque la mayoría de nosotros reconozcamos que las teorías

cuánticas cartografían nuevos territorios, persistimos en tratar de comprenderlas en términos clásicos —tal como Colón llamó Indias a las tierras por él descubiertas al no advertir la novedad de su descubrimiento. Encontramos ventajoso denominar a una función, función de *onda* y en dibujar figuras de frentes de *onda*— sólo para apuntar que la "onda" es una función compleja y que su principal oficio es informarnos dónde es probable se encuentre la *partícula*. Encontramos intuitivo llamar a la ecuación de Schrödinger ecuación de *onda* —sólo para agregar que gobierna la propagación de ψ en un espacio 3N-dimensional. Encontramos conveniente hablar de la *difracción* de *partículas* por un cristal (¿por qué no de la colisión de ondas?) y de defasaje de la *onda* asociada a una *partícula* producido por un campo externo. Vamos así amontonando inconsistencias con la esperanza de que el principio de complementaridad, como la confesión, nos absuelva.

Pero podemos hacer aún mejor: con inteligencia e ingenio, la física clásica puede reformularse en términos que rememoren a la teoría cuántica. Así, la mecánica de partículas puede formularse, dentro del marco de Hamilton-Jacobi, como una teoría de campo que se ocupa de la propagación de una onda ficticia construida con la ayuda de una solución de la ecuación de movimiento. Si se requieren análogos clásicos de segunda cuantización, también éstos pueden suministrarse (Schiller, 1967; Bourret, 1967). En resumen, así como casi toda fórmula cuántica no relativista puede ser malinterpretada en términos clásicos, así casi toda fórmula clásica puede ser reformulada de modo (pseudo) cuántico. Desafortunadamente, en este último trance, pocas de estas analogías son otra cosa que juegos formales: rara vez producen nuevas explicaciones y nunca conducen a nuevas predicciones específicas. Tratar de descubrir el cuanto en la física clásica es tan falto de esperanza como tratar de leer la MC y la EDC en términos clásicos.

La evasión de esta jungla de incoherencias, oscuridades y metáforas es harto simple, a saber, considerar los microsistemas como individuos paganos. Por lo tanto, deberían rebautizarse con nombres paganos, tales como *cuantón* (nombre de familia) y los nombres genéricos *hylon* (de ὕλη, materia) y *pedión* (de πεδίον, campo). Incluso el nombre de las teorías de que nos ocupamos, podría cambiarse prove-

chosamente, por ejemplo, en *hilónica* (= mecánica cuántica), *pediónica* (= teoría cuántica del campo) y *cuántica* (la unión de las dos). Al fin y al cabo, la física cuántica es un advenedizo con éxito, y todo advenedizo con éxito necesita un nuevo nombre que encubra su origen.

Desde luego, esto es sólo cuestión de nombres: los conceptos clásicos deben ser o reformados o borrados de la teoría cuántica salvo que lleguen a funcionar en ella como lo hacían en la física clásica. Así, en la teoría elemental, los conceptos de masa, carga y campo electromagnético son clásicos. En cambio, lo que usualmente se denomina el operador representativo de la posición de la partícula no es clásico: "x" designa sólo un punto en el espacio de configuración y, salvo que se dé la distribución probabilitaria, un valor específico de x no nos dice nada sobre la localización vaga del cuantón. Sólo el promedio cuántico de x, construido con la ayuda de esa densidad de probabilidad, es el análogo de la coordenada de posición clásica, según lo muestra tanto la estructura formal del concepto como la analogía formal entre las ecuaciones de movimiento correspondientes. Los fundamentos de la MC y la EDC pueden y deben echarse sin la ayuda de analogías clásicas ni de mediciones más o menos ideales —tal como la termodinámica se formula en nuestros días sin la ficción del calórico y sin recurrir a ciclos de máquinas térmicas.

Sólo cuando buscamos los límites de correspondencia clásicos o semiclásicos, o cuando aplicamos la teoría general a casos particulares, estamos autorizados a buscar de nuevo inspiración en la física clásica. Podemos descubrir versiones cuánticas de fórmulas clásicas e, inversamente, análogos clásicos de fórmulas cuánticas. (Una expresión C puede llamarse *análogo clásico* de una expresión cuántica Q si y sólo si C y Q desempeñan papeles homólogos en fórmulas formalmente análogas, o bien C es un límite de correspondencia de Q.) Y también nos valdremos de la física clásica cuando conjeturemos hamiltonianos o lagrangianos cuánticos. Tomándolos de la física clásica y reescribiéndolos en términos cuánticos con la ayuda de reglas heurísticas realizamos una práctica honesta siempre que no interpretemos los nuevos hamiltonianos en términos clásicos. (No obstante, el préstamo no surte efecto en dos casos importantes: cuando el hamiltoniano clásico no puede ser simetrizado de modo inambiguo, y cuando están en juego interacciones radicalmente nuevas, tales como fuer-

zas de intercambio.) En cualquier caso, tenga o no análogo clásico una fórmula cuántica, no debería interpretarse en términos clásicos sino según los axiomas de interpretación de la teoría. Y estas suposiciones (denominadas también "reglas de correspondencia" y en ocasiones "definiciones operacionales") debería ser literal antes que metafórica, a la par que objetiva antes que centrada en el observador.

Se asigna una *interpretación literal y objetiva* a una teoría física asignando a cada uno de sus símbolos primitivos referenciales un objeto físico —ente, propiedad, relación, o acaecimiento— antes que una imagen mental o una operación humana. Así, el vector de estado no se interpreta adecuadamente como campo de ondas (al estilo del campo electromagnético) ni como vehículo de información, sino como representando el estado del sistema en cuestión —tal como en la mecánica estadística todo estado de un sistema de N-cuerpos se representa en un punto en el correspondiente espacio 6N-dimensional de las fases. El hecho de que la evolución del estado del sistema se describa (en la formulación de Schrödinger) por una ecuación que nos recuerda una ecuación de onda, no prueba la existencia de una analogía substancial, tanto más cuanto que son concebibles muchas interpretaciones diferentes (Bunge, 1956).

Al igual que con los fundamentos pasa con las aplicaciones: el pensamiento analógico, por fértil que sea como punto de arranque, se convierte eventualmente en confuso. Un caso característico es la teoría de muchos cuerpos con sus veinte o tantas cuasi partículas y pseudo partículas. Así, sobre la base de una analogía con el campo electromagnético, se conjeturó que las ondas de sonido están cuantizadas, esto es, que la energía elástica cinética de un cuerpo equivale a un número entero de cuantos o fonones de sonido. Esta hipótesis se expandió eventualmente en una teoría que encontró abundante confirmación empírica. Pero la analogía, aunque fructífera, es superficial: mientras que un fotón es un pedazo de campo electromagnético y puede adquirir una existencia autónoma liberándose de su fuente, un fonón no es tal cosa independiente: es una propiedad de un sistema complejo: no hay fonones libres. Similarmente con las otras cuasi partículas y con las llamadas resonancias en la teoría de las partículas elementales: son estados de cosas más bien que cosas independientes. Sugerir que se comportan *como*, o *como si* fuesen, partículas fue inte-

ligente, pues puso en marcha la maquinaria conceptual. Sostener que *son* partículas carece de sentido, pues no exhiben las características definitorias de una partícula, a saber, existencia independiente, localización precisa y masa. Aun así, la actual literatura física rebosa de tales sinsentidos analógicos.

7. INTERPRETACIÓN Y EXPLICACIÓN RIGUROSAS: LITERALES Y NO METAFÓRICAS

Los poetas, teólogos y ocultistas recurren a metáforas y analogías arguyendo que manejan asuntos que desafían la descripción directa o incluso aún la compresión racional. Los profesores usan la misma triquiñuela por una razón diferente, a saber, salvar el paso entre lo desconocido y lo familiar. ¿Quién, entre nosotros, ha resistido a la tentación de imaginar los electrones en ocasiones como balones y en otras como paquetes de ondas? Sin embargo, sabemos que tales metáforas y analogías son, en el mejor de los casos, apoyaturas didácticas, en el peor, trampas didácticas, siempre *Ersätze* de la cosa real. Por consiguiente, intentamos evitarlos en la investigación. Deseamos que la ciencia se ocupe de lo que las cosas son, no de lo que las cosas parecen: la ciencia no es poesía, teodicea o ciencia oculta. Mientras que deseamos que la analogía guíe nuestras exploraciones preliminares (nótese la metáfora), sentimos que es erróneo permitir que desempeñe un cometido en una teoría madura: queremos esto para pintar la cosa misma más bien que algo que superficialmente se le parezca. En otras palabras, queremos *interpretaciones literales* —aun si no se les asignan visualizaciones familiares— porque queremos objetividad. Sólo en las matemáticas estamos interesados en reflejar estructuras conceptuales entre sí. Los marcos conceptuales de la ciencia factual se supone que reflejan (simbólica y parcialmente, a buen seguro) cosas reales no otras construcciones. Perseverar en la analogía dentro de la ciencia factual es andarse con rodeos: el pensamiento analógico es característico de la protociencia (v. g., la historia) y la pseudociencia (v. g., el psicoanálisis). La ciencia madura es literal tanto como objetiva. Su epistemología es, consiguientemente, realista. (Véase Bunge, 1972a, capítulo 10.)

Una *interpretación literal y objetiva* de un símbolo básico (primitivo) s que figura en una teoría física T asigna a s un objeto físico p, sea ente (v. g., átomo), propiedad del mismo (v. g., el impulso angular del átomo) o un cambio del mismo (v. g., un salto en el valor del impulso angular). En resumen, $p = Int(s)$. Una interpretación literal y objetiva de una teoría física T consistirá, consiguientemente, en una aplicación $Int: S \rightarrow P$ del conjunto S de los símbolos básicos de T al conjunto P de sus equivalentes físicos. Si P reside en otro campo, cubierto por una teoría T' (esto es, si $P \subset P'$, donde P' es el conjunto de objetos físicos a los que se refiere T'), entonces T será interpretada por *analogía* con T'. En particular, si T es una teoría cuántica y T' una teoría clásica y P está incluido en el referente de T', entonces la interpretación clásica de T será metafórica. Y si P posee un recubrimiento no vacío con un conjunto de objetos psicológicos tales como disposiciones y capacidades humanas (digamos, observabilidad, incertidumbre, y predictibilidad) entonces T será una teoría psicofísica más bien que estrictamente física.

Lo que vale para la interpretación vale para la explicación: si se asigna al formalismo de una teoría física una interpretación literal y objetiva, entonces toda explicación fraguada con ayuda de esa teoría será literal también. No rechazaremos enteramente la explicación metafórica: se la tolerará, *faute de mieux*, en la fase de la construcción de la teoría. Así, habría sido insensato rechazar las analogías hidrodinámicas del "flujo" de calor y electricidad al comienzo —tan insensato como considerarlas substanciales más bien que formales. Asimismo, los teóricos de la información hacen bien en aprovecharse de la similitud formal entre información y negentropía. Pero es abusivo invertir la jugada y reducir el aumento de entropía a una pérdida de información humana acerca del sistema, pues ello priva a la mecánica estadística y a la termodinámica de objetividad. En otras palabras, una interpretación de "S" en la mecánica estadística debe asignarle una propiedad física objetiva, no el estado del conocimiento humano. Asimismo, si la MC y la EDC han de contar como teorías físicas, entonces hay que asignar a ψ un significado físico de modo literal y objetivo.

Las explicaciones cuánticas, cuando despojadas de observadores supernumerarios e instrumentos de medición, son ciertamente menos

intuitivas de lo que llegaron a ser muchas explicaciones clásicas después de haber sido consideradas como no claras por Leibniz y los cartesianos con su insistencia en explicarlo todo en términos de figuras y movimientos. Con todo, las teorías cuánticas explican en un sentido perfectamente ortodoxo de "explicación", a saber, como deducción de suposiciones generales (en particular, leyes) y premisas particulares (v. g., datos). Pero, así como la termodinámica, la mecánica del continuo y la teoría electromagnética no pueden comprenderse en términos corpusculares y son, por cierto, inintuitivas y, ocasionalmente, incluso contraintuitivas, así las teorías cuánticas piden nuevos modos de comprensión. Bohr llegó incluso a aseverar que un nuevo concepto de comprensión se hallaba en juego. Vino a decir que "Merced a la mecánica cuántica el significado de la palabra "compresión" ha cambiado de modo tal que aquí, también, tenemos que habérnoslas con una compresión completa de los fenómenos cuánticos" (Heisenberg, comunicación personal, 1970). Yo lo diría de este otro modo: Hemos logrado una *explicación* satisfactoria de muchos (no todos) los fenómenos cuánticos aun si somos incapaces e incluso no deseamos *comprenderlos* en términos *tradicionales*, particularmente en términos de conceptos clásicos como los de partícula y onda, que por derecho no pertenecen a la mecánica cuántica. En todo caso, la comprensión es una categoría psicológica, no epistemológica. Y quienes se sienten defraudados por la escasa "comprensión" que la mecánica cuántica les aporta, deberían sentirse aliviados al decírseles (*a*) que cuanto más persistan en emplear imágenes heurísticas tanto menos comprenderán la teoría y (*b*) no deberían esperar encontrar una cinemática o teoría del movimiento en la mecánica cuántica sólo porque reciba el nombre equívoco de *mecánica* (recuérdese la sección 6).

La situación, pues, es ésta. Si queremos construir o aprender nuevas teorías, entonces hemos de usar probablemente la analogía como puente entre lo conocido y lo desconocido. Mas tan pronto como la nueva teoría está a mano, debería sometérsela a un examen crítico con la finalidad de desmontar su andamiaje heurístico y reconstruir el sistema de modo literal –siendo éste uno de los usos de la axiomatización. Una vez lograda esta reconstrucción, esto es, una vez descubierto no lo que la teoría parece sino lo que es, y no lo que los referentes de la teoría remedan sino lo que son, hemos de rehusar el reconoci-

miento de cualquier explicación metafórica en el campo cubierto por la teoría, pues será una pseudoexplicación. Sugerir que la explicación científica es metafórica es confundir las teorías científicas con las parábolas bíblicas o suscribir el instrumentalismo, según el cual "todo conocimiento, salvo que establezca sólo sucesión actual y coexistencia, únicamente pueda ser analógico" (Vahinger, 1920, p. 42).

8. Modelos

¿Qué, acerca de los modelos: debería considerárseles como meros auxiliares heurísticos a ser descartados una vez construida la teoría? La respuesta depende del sentido de la polimorfa palabra "modelo", término tan ampliamente usado como poco analizado en la reciente filosofía de la física. Hay dos sentidos en los que los modelos son, en efecto, ingrediente de las teorías físicas y otros dos en los que no precisan serlo.

Si "modelo" se toma para significar *representación visual* o analogía con la experiencia familiar (Hutten, 1956), entonces es claro que no toda teoría comporta un modelo. Así, las teorías de campo, sean clásicas o cuánticas, apenas son visualizables. Y si "modelo" se toma para significar *mecanismo* —bien sea en un estrecho sentido de mecánico, bien en un sentido amplio incluyendo mecanismos no mecánicos tales como el mecanismo del campo mesónico de las fuerzas nucleares— entonces algunas teorías contienen modelos de este tipo mientras que otras no. (Las primeras pueden denominarse teorías mecanísmicas o representacionales mientras que las últimas pueden llamarse fenomenológicas o de la caja negra: d'Abro, 1939, Bunge, 1964b.) Consecuentemente, la idea neo-Kelvinista de que toda teoría científica contiene o presupone un modelo consistente en una representación pictórica o analogía, no es adecuada. Por lo que la opinión asociada, según la cual tanto la interpretación científica cuanto la explicación científica requieren representaciones visuales, es también falsa.

En cambio, en un tercer sentido, toda teoría física *es* un modelo, a saber, del formalismo matemático subyacente. Más aún, toda teoría física es, por dos veces, un modelo en el sentido de la teoría de los modelos: en una, por poseer cada uno de sus signos básicos una interpre-

tación particular dentro de las matemáticas, en otra, porque el mismo signo puede tener también una interpretación física —como sucede con todos los los primitivos referenciales. Así, en mecánica "*m*" puede ser interpretado en primer lugar como un número, luego como la masa del cuerpo. La interpretación final de "*m*" es entonces la composición de una función de interpretación matemática y otra física: se asigna al signo un número que a su vez se interpreta como valor de masa. *Mutatis mutandis* para el simbolismo global de la teoría. Precaución: éste, el sentido de "modelo" en la teoría de los modelos, puede ser usado sólo en conexión con teorías axiomatizadas, pues un modelo de una teoría factual no interpretada se contruye asignando a cada uno de los primitivos de la teoría una interpretación factual —y no se sabe cuáles son los primitivos antes de axiomatizar la teoría. Pero debido a que la interpretación es factual y el resultante formalismo interpretado es satisfecho (si acaso) sólo aproximadamente por sus referentes, el concepto matemático de modelo es de poco interés en relación con las teorías en la ciencia factual. (Véase Bunge, 1972a.)

Y, en un cuarto sentido, toda teoría física *específica* (pero no toda teoría) *contiene* un modelo o boceto de su referente particular. (Recuérdese el capítulo 3, sección 4.) Las fórmulas generales de una teoría son no específicas, de suerte que no bastan para resolver problemas particulares, tales como encontrar la trayectoria de un proyectil o los modos de propagación de una onda en una guía de ondas o los niveles de energía de un átomo. A fin de resolver un problema específico cualquiera, hay que suministrar un número de suposiciones específicas y de datos concernientes al particular sistema físico referido: el número y naturaleza de las partes y sus interacciones supuestas, los vínculos y las ecuaciones constitutivas, las condiciones iniciales y en la frontera, etc. Y estas hipótesis y datos subsidiarios, que se adjuntan a los axiomas genéricos de la teoría para remediar su indeterminación, constituyen conjuntamente un *modelo conceptual* del sistema concreto. Un modelo en este cuarto sentido es, entonces, un conjunto de *enunciados* que especifican (crudamente) la naturaleza del referente de la teoría de modo más preciso de lo que lo hacen las suposiciones generales (y, por ello, altamente indeterminadas).

He aquí algunos ejemplos de modelos conceptuales en física: (1) el modelo de esfera dura de un gas; (2) el modelo de Ising de un cuer-

po en una fase condensada: una formación de átomos o moléculas espaciados regularmente de modo tal que cada uno de ellos interactúa sólo con sus más próximos vecinos; (3) el modelo clásico de un fluido, o incluso del universo entero como un medio continuo con determinada densidad y distribución de tensión; (4) el modelo elemental de una corriente eléctrica como una corriente unidimensional de densidad infinita; (5) la barrera de potencial como representativa de una fuerza externa y el pozo de potencial como esquematización de una fuerza interna atractiva en la mecánica cuántica. Nótese, en primer lugar, que todo modelo semejante encierra algunos de los conceptos de una teoría determinada, pues de lo contrario no se le adjuntarían. En segundo lugar, ninguno de estos modelos se compromete con un conjunto específico de enunciados legales: cada uno de dichos modelos puede figurar en teorías ampliamente diferentes e, incluso, mutuamente incompatibles de una determinada clase (clásicas y cuánticas, no relativistas y relativistas, etc.). En resumen, el modelo conceptual no es parte de los fundamentos de una teoría general: esta teoría debe estar a mano, tan plenamente interpretada como posible, si ha de ser aplicada a un modelo, convirtiéndose con ello en teoría específica —v. g., una teoría cuántica no relativista del átomo de helio. Esto es, el modelo no contribuye, salvo heurísticamente, a dotar a la teoría general de significado factual (v. g., físico). En tercer lugar, un modelo conceptual no es ni desocupado ni fiel: es o, más bien, se supone que es, y así se toma hasta que se pruebe lo contrario, una representación aproximada de una cosa real.

El que un determinado modelo conceptual o representación de un sistema físico resulte susceptible o no de figuración, es irrelevante para la semántica de la teoría a la que eventualmente se vincula. La figurabilidad es un accidente psicológico afortunado, no una necesidad científica. Pocos de los modelos que pasan por representaciones visuales son en todo caso figurativos. Por lo pronto, el modelo puede estar y usualmente está constituido por items imperceptibles tales como partículas inextensas y campos invisibles. Ciertamente, un modelo puede recibir una representación gráfica —pero lo mismo puede suceder con cualquier idea con tal que se toleren diagramas simbólicos o convencionales. Los diagramas, sean simbólicos o representacionales, carecen de significado a menos de vincularse a algún cuerpo

de teoría. En cambio, las teorías no tienen necesidad de diagramas salvo para propósitos psicológicos. Mantengamos, pues, los modelos teóricos aparte de los análogos visuales. (Más sobre modelos en Bunge, 1972a.)

9. Conclusión

En la ciencia factual, la analogía y la inferencia analógica son bienvenidas en cuanto instrumentos de construcción teórica. Por lo mismo, son signos de crecimiento, síntomas de que la teoría se encuentra en proceso de desarrollo más bien que en la madurez. Una electrodinámica clásica madura no tiene necesidad de tubos elásticos de fuerza: el campo —una sustancia no mecánica— basta para todos los propósitos, considerándose los análogos mecánicos como arreos suprimibles. Asimismo, una electrodinámica cuántica madura no necesitará fotones virtuales que salten desde los electrones y vuelvan a ellos: considerará los diagramas de Feynmann como recursos mnemónicos ligados a un método de computación más que como descripciones literales (Bunge, 1955b).

Cuando una teoría factual alcanza la madurez, ésta comporta sólo interpretaciones literales y produce sólo explicaciones literales: no comporta *como síes*. Seguramente, la explicación científica, si profunda, es algo más que pura deducción de leyes y datos: será una subsunción bajo generalidades, ciertamente, pero entre éstas, figurará alguna hipótesis de mecanismo —esto es, algunas suposiciones irán más allá de relaciones externas o input-output. Sin embargo, tales explicaciones en profundidad, o explicaciones interpretativas, son ajenas a las explicaciones metafóricas, que son superficiales por estar limitadas a similitudes y por no ocuparse de la cosa real. Correspondientemente, la perspectiva metafórica de la explicación científica, que recientemente ha sido recomendada en lugar de la versión deductivista (Hesse, 1966), es totalmente inadecuada.

Corresponde al investigador en fundamentos y al filósofo de la ciencia (i) reconocer los dones espléndidos que los enunciados de analogía y las inferencias analógicas pueden aportar a la construcción teórica, (ii) analizarlos más que describirlos en términos metafóricos,

(iii) exponer el uso acrítico de analogías y argumentos por analogía en la ciencia, (iv) distinguir las suposiciones constitutivas de las puramente heurísticas (como Kant hizo hace dos siglos), y (v) ayudar a que la ciencia se desembarace de su andamiaje heurístico, pues, de mantenerlo más allá de la fase inicial de construcción, obstaculizará eventualmente el desarrollo posterior y esclarecimiento del edificio teórico, como por cierto acontece ahora con algunos de los análogos clásicos que subsisten en las teorías cuánticas, mucho después de haber agotado su poder heurístico. Ahora bien, el mejor modo de despejar el andamiaje heurístico y localizar las suposiciones reales (tanto las manifiestas como las latentes) de una teoría es exhibir sus fundamentos axiomáticos. Ocupémonos entonces de la axiomática física.

Capítulo 7

EL FORMATO AXIOMÁTICO

1. Los tres enfoques de la teoría física

Una teoría científica puede ser expuesta en una cualquiera de estas tres maneras: histórica, heurística o axiomáticamente. Una exposición histórica, si fiel y comprensiva, desplegará la situación original del problema, las diversas tentativas efectuadas para hacerle frente —incluyendo las equivocadas—, el modo cómo se justificó la solución adoptada, y su influencia real o probable en desarrollos futuros. Es innecesario decir que, aunque la historia de la física se desarrolla con rapidez, pocos estudios históricos cumplen con todas la tareas precedentes. El enfoque heurístico, de otra parte, se centra en las fórmulas más útiles (no necesariamente las más fundamentales) de la teoría y se lanza a elaborar sus consecuencias y a aplicarlas. Es el punto de vista adoptado en la enorme mayoría de las publicaciones y cursos de física. Mientras que los formatos histórico y heurístico son esclarecedores, el primero no es práctico: si lo que deseamos es una formulación breve o una rápida presentación del tema, entonces es preferible el enfoque heurístico.

No obstante, los enfoques histórico y heurístico no exhiben la teoría en su totalidad: guardan silencio acerca de la mayoría de las presuposiciones de la teoría, no despliegan todas sus premisas básicas, dejan en la oscuridad su estructura lógica, y son ambiguos, cuando no abiertamente incoherentes, en lo relativo a su significado físico. Todo profesor consciente y todo estudiante cuidadoso se sienten insatisfechos con esos dos enfoques asistemáticos y tratan de complemen-

tar algunas de las premisas ausentes, o de aportar algún rigor a esta o esa demostración, o refinar la interpretación física de algunos de los símbolos en cuestión. De ahí la variedad de formulaciones y la correspondiente abundancia de libros de texto y artículos de actualización. Por mucho que estas tentativas de esclarecimiento y reconstrucción puedan triunfar en puntos particulares, se limitan a ser en el mejor de los casos parcialmente útiles, pues no son lo suficientemente sistemáticas —no remodelan la teoría en cuanto totalidad— cuando, la esencia de toda teoría es la sistematicidad. En efecto, desde un punto de vista lógico, una teoría es, por definición, un sistema y, más precisamente, un sistema hipotético-deductivo, esto es, sistema que parte de un manojo de hipótesis y procede deductivamente. (Recuérdese el capítulo 3.) Y con los sistemas no se juega —salvo para, deliberadamente, cambiarlos en sistemas diferentes.

Si lo que se busca es una formulación más precisa y, por consiguiente, una compresión más plena y profunda de una teoría, bien sea por motivos pedagógicos o con la mira puesta en mejorar la teoría —o simplemente para el propio deleite intelectual personal— entonces se preferirá el enfoque axiomático. En efecto, es el único que ofrece una versión global de una teoría y el único que se centra en sus ingredientes esenciales en lugar de distraerse con derivaciones, aplicaciones, o zig-zags históricos y psicológicos. El enfoque axiomático va directo al corazón de la teoría. Más aún, por su misma naturaleza, un sistema de axiomas no puede cargar con detalles: éstos se dejan para las aplicaciones.

No obstante, no hay conflicto entre los tres modos de exponer una teoría: cada uno ilumina una faceta diferente de un objeto complejo y cada uno tiene su propia meta. El primero se interesa en la biografía de una teoría, el segundo en sus capacidades y rendimiento, y el tercero en lo que puede llamarse su carácter: sus fundamentos, tanto en lo referente a su estructura cuanto a su contenido. Sería erróneo, por lo tanto, alegar que uno de los tres procedimientos es absolutamente superior a otro o a ambos. Los tres son mutuamente complementarios y, consecuentemente, una educación científica bien perfilada, aun cuando centrándose en el formato heurístico o intuitivo, debería dar una idea de los extremos del caos histórico y el orden axiomático.

Dado su empleo universal, no defenderé el enfoque heurístico. Ni abogaré por el histórico, pues todo especialista científico culto gusta de leer en la historia de su tema. En su lugar, asumiré la defensa de la impopular causa de la axiomática, que es ampliamente malentendida y apenas practicada fuera de las matemáticas. (Véase, no obstante, Woodger, 1937; Carnap, 1958; Henkin *et al.* 1959; Bunge, 1967a, 1967b, y Suppes, 1969.)

2. Las lecciones de Euclides, Hilbert, y Gödel

Antes de Euclides (fl. 300 a. de C.) hubo opiniones y doctrinas, pero hasta donde alcanza la prueba documental existente apenas existió teoría en el sentido moderno, con la sola excepción de la teoría de las proporciones de Eudoxo. Esto es, había enunciados más o menos laxamente conectados y no sistemas hipotético-deductivos, esto es, sistemas basados en suposiciones iniciales explícitamente enunciadas (llamadas también axiomas o postulados). Ciertamente, la noción de prueba se inventó un par de siglos antes (probablemente en la escuela pitagórica) y la necesidad de establecer algunas suposiciones a fin de probar algo fue reconocida junto con el concepto de consecuencia lógica. Pero las pruebas estaban tan aisladas como las propias premisas: ninguna de las dos era sistémica. Fue el reino feliz del solucionador de problemas más que el del constructor de teorías: los problemas se abordaban uno tras otro y se resolvían asiendo cualesquiera premisas que pareciesen prometedoras, sin cuidarse mucho de su circularidad o coherencia, menos aún de su homogeneidad (la pertenencia a un conjunto de items mutuamente relacionados).

El sistema de geometría que Euclides expuso en sus *Elementos* no consistió sólo en un apilamiento de recetas de cálculo (como casi toda la matemática sumeria y egipcia). El sistema de Euclides fue incluso más que una vasta colección de piezas de conocimiento matemático: fue probablemente la primera teoría plenamente elaborada inventada por la humanidad. Empequeñecer a Euclides diciendo que "sólo" codificó el conocimiento matemático de sus días es revelar una pobre comprensión de la naturaleza e importancia de las teorías. Es más,

Euclides formuló su teoría geométrica del modo más completo y coherente posible en su tiempo —a saber, del modo axiomático que él mismo introdujo. La lección de Euclides en la metodología de la construcción de teorías fue entonces ésta: *Si nos interesa la sistematicidad y el rigor, intentemos el método axiomático.*

Bien que siempre admirada como paradigma de la formulación teórica —hasta el punto de que Spinoza, Newton y muchos otros trataron de formular sus principales teorías *more geometrico*, esto es, axiomáticamente— la axiomática permaneció durante mucho tiempo en barbecho hasta fines del siglo pasado. Fue revivida en ese momento por dos grupos de matemáticos: aquellos que empezaron a constatar las similitudes formales entre un número de teorías diferentes (dando origen de este modo a los conceptos de teoría abstracta y de modelos), y los que se preocupaban por las trampas que permanecían ocultas en las formulaciones intuitivas o heurísticas de ciertas teorías —primero, el cálculo, después la teoría de conjuntos. La axiomática se trajo de nuevo a luz, en resumen, como instrumento de unificación, esclarecimiento y limpieza.

Los dos sistemas de axiomas más influyentes de ese período inicial de la axiomática moderna fueron, desde luego, la reformulación axiomática de G. Peano de los postulados de Dedekind del sistema de números naturales (1889) y los *Grundlagen der Geometrie* de Hilbert (1899). Hilbert vindicó y revisó a la par el método de Euclides, logrando un control más riguroso de las suposiciones y deducciones —entre otras cosas evitando dibujos, exclusión que le obligó a enunciar todas sus premisas en forma simbólica explícita. Dejando a un lado su intrínseca significación matemática, la lección metateórica de Hilbert fue ésta: *Ningún sistema de axiomas es final: siempre es posible, en principio, extraer capas de axiomas más profundas (más fuertes)* (Hilbert, 1918).

Desde ese tiempo, la mayoría de los constructores de teorías han considerado la axiomática como el formato ideal de las teorías matemáticas, particularmente en álgebra, pero crecientemente también en otras ramas de la matemática. El formato ideal mas no el perfecto: no sólo que, como lo vio Hilbert, todo período proporciona los materiales para construir el mejor sistema de axiomas en un determinado campo, sino que ninguna teoría rica puede ser perfecta aun cuando se

la exponga axiomáticamente. En efecto, Gödel (1931) probó que ningún sistema de axiomas consistente que involucre la aritmética puede contener a toda fórmula en el campo que intenta sistematizar: todo sistema tal es necesariamente incompleto si es consistente. (Y, si consistente y completo, el sistema no es plenamente axiomatizable.) Ciertamente, siempre puede construirse un sistema de axiomas más fuerte, como Hilbert nos ha encargado hacer, que abrace más enunciados que los de la teoría anterior. Pero aún así continuará siendo incompleto: la perfección, entonces, no ha de ser igualada al ideal alcanzable. La lección de Gödel concerniente a la construcción de teorías fue, en píldora, ésta: *No puede haber sistema de axiomas perfecto: todo lo que podemos y debemos intentar son sistemas de axiomas mejorados.*

Todo sistema de axiomas particular es por tanto limitado, pero no hay limitación a priori a la sucesión de sistemas de axiomas progresivamente mejores. La axiomática es imperfecta pero no hay a la vista mejor tipo de formulación de teorías, así que renunciar a la axiomática por sus limitaciones es como proponer segar el linaje humano por no poder haber individuo perfecto. Además, la imperfección es necesaria para el progreso.

3. El estado actual del arte en la física

Hilbert fue no sólo uno de los más grandes matemáticos y lógicos de la historia sino también un distinguido físico teórico y un campeón del uso de la axiomática en la totalidad de la ciencia. En 1900 lanzó un desafío en el Congreso Internacional de Matemáticas en París planteando veintitrés difíciles problemas abiertos. La mayoría de ellos han sido desde entonces resueltos, algunos sólo muy recientemente. Pero el celebrado sexto problema de Hilbert, a saber, *axiomatizar teorías físicas*, continúa ampliamente abierto. El propio Hilbert dedicó cierto esfuerzo a esta tarea axiomatizando la teoría fenomenológica o elemental de la radiación (Hilbert, 1912, 1913, 1914) y su propia teoría de campo unificada de la gravitación y el electromagnetismo (Hilbert, 1924). Lamentablemente, erró en la elección de los temas: la primera teoría ha estado desde el *putsch* cuántico de Planck en revi-

sión (la revolución cuántica llegó mucho más tarde) y la segunda teoría fue prematura. Así, los ensayos de Hilbert en axiomática física apenas recibieron atención. Con pocas excepciones, los físicos han continuado formulando sus teorías de modo casual, en ocasiones hasta de modo confuso.

Ha habido algunas excepciones, sin embargo. La mejor conocida, o al menos la más citada, es la formulación un tanto incompleta de la termostática de Carathéodory (Carathéodory, 1909). Apenas se ha usado por su carácter inintuitivo. Además, comete el error habitual de buscar el significado físico en los experimentos. Esto es erróneo aunque sólo sea porque (*a*) usualmente alguno de los teoremas, no los postulados, son los que se acercan suficientemente a los experimentos; (*b*) el diseño e interpretación de un experimento implica no sólo la misma teoría de que nos ocupamos sino también diversas teorías (auxiliares) capaces de manejar los diversos rasgos del montaje experimental (véase capítulo 10); (*c*) todas estas teorías deben estar a mano, dotadas de un contenido más o menos preciso, antes de poder ser aplicadas; (*d*) no se espera que los experimentos revelen significados —sino, más bien, que produzcan datos capaces de poner a prueba teorías, aplicándolas, e iluminando nuevas cuestiones; y (*e*) el problema del significado parte de los bloques de construcción (los conceptos no definidos) de la teoría: éstos son los únicos que deben tener contenido si los constructos compuestos han de lograr alguno. En resumen, el primer ensayo de Carathéodory en la axiomática física iba emparejado con la insostenible filosofía del operacionalismo.

Los siguientes ensayos mejor conocidos en la axiomática física fueron las presuntas axiomatizaciones de la relatividad especial por Carathéodory (1924) y por Reichenbach (1924). Partieron de suposiciones similares y fueron igualmente infructuosos. En particular, ambos pasaron por encima de la teoría del campo electromagnético de Maxwell, sin la cual la relatividad especial posee escaso sentido, aunque sólo sea porque se refiere a acaecimientos conectables por perturbaciones electromagnéticas. Estas dos formulaciones consideraron los objetos de la teoría como puntos materiales más que sistemas físicos inespecificados y marcos de referencia inmersos en un campo electromagnético; ambas supusieron que todo punto material podría alojar a un observador capaz de emitir y recibir señales de luz a vo-

luntad y sin retroceso; y ninguno de estos sistemas de axiomas implicaba las fórmulas de transformación de Lorentz. Aun así, la pseudoaxiomática de Reichenbach todavía pasa por perfecta o casi entre los filósofos.

Otra tentativa famosa fue la de von Neumann (1932) en relación con la mecánica cuántica. Su libro, hizo época por enriquecer el formalismo matemático de la teoría; sin embargo, se supuso erróneamente que von Neumann había echado los fundamentos axiomáticos de la mecánica cuántica. De hecho, su exposición carece de todas las características de la axiomática moderna: no revela sus presuposiciones, no identifica los conceptos básicos de la teoría, no enumera todas las suposiciones iniciales (axiomas), no propone una interpretación física consistente del formalismo, y está repleta de inconsistencias e ingenuidades filosóficas. (Véanse capítulos 4 y 5.) Pese a ello, pasa, por alguna extraña razón, por modelo de la axiomática física. Pero entonces no es el primer caso: también la formulación de Mach de la mecánica clásica de partículas (Mach, 1942) pasa a menudo por axiomatización de la misma aun si Mach no llegó nunca a acercarse a la axiomática y lo que, es más, sospechase de toda teoría, pues para él sólo los hechos contaban (véase Bunge, 1966).

En el interín, el estudio de los sistemas de axiomas hizo avances dramáticos. Nacieron disciplinas totalmente nuevas —la metamatemática y la teoría de modelos— que hicieron contribuciones importantes a la teoría de teorías durante el período de entreguerras, y aceleraron considerablemente su ritmo tras la última. El primer ensayo de axiomática física que tomó en consideración algunos de estos adelantos fue probablemente la obra de McKinsey *et al.* sobre la mecánica clásica de partículas (McKinsey, 1953). Fue la primera vez que los conceptos primitivos de una teoría física fueron aislados y caracterizados, la primera vez que se formularon los axiomas necesarios de la teoría, y la primera vez que fueron sometidos a las pruebas metamatemáticas de consistencia e independencia (pruebas, a la vez, a nivel de conceptos y a nivel de enunciados). A continuación, viene la axiomatización de una teoría mucho más rica y más realista, a saber, la mecánica clásica del continuo (Noll, 1959). Su obra puso especial énfasis en la modernidad y el rigor matemático, y se valió del análisis funcional. Un tercer paso importante fue dado por Edelen (Edelen, 1962),

quien axiomatizó una clase entera de teorías clásicas de campo. Estas tres obras han sido pioneras en sus campos y han mostrado, entre otras cosas, cómo la axiomática puede ayudar a configurar y extender la física clásica, además de proporcionar una comprensión más profunda de la misma. Con todo, ninguna de ellas, harto curiosamente, ha encontrado entrada en los libros de texto de física: preferimos enseñar unas matemáticas pasadas e ignorar la lógica —y, en ocasiones, incluso capítulos enteros de física, tales como la mecánica del continuo.

Los trabajos mencionados hasta ahora fueron debidos a matemáticos o a lógicos. Consiguientemente, con la excepción de Hilbert, no se ocupan mucho del contenido físico. O, caso de prestarle alguna atención, lo toman a menudo acríticamente de la doctrina operacionalista del significado físico, según la cual la contrastabilidad es necesaria para la significatividad, y no al revés.

Las contribuciones recientes de los físicos a la axiomática física incluyen, primero y ante todo, la obra de Wightman y su escuela sobre la teoría cuántica de campos. Esta investigación, motivada parcialmente por conocidas incoherencias (v. g., divergencias) en las formulaciones usuales de la electrodinámica clásica (Wightman, 1956) ha sido curiosamente malentendida. A algunos les disgusta su intento de rigor matemático; otros le reprochan el no haber predicho "efecto" nuevo alguno; otros la objetan porque postula la existencia de un ente inobservable —un campo— y finalmente otros porque parecen pensar que "axiomática" significa *a priori*, independiente de la experiencia, y, consecuentemente, impenetrable a ésta. Pocos toman la teoría axiomática de campo por lo que es: un intento de "analizar las nociones que subyacen a todas las teorías de campo cuánticas relativistas" (Jost, 1965), sin pretensiones de finalidad o incorregibilidad.

Esta revisión breve e incompleta de la axiomática física debería bastar para mostrar su inmadurez actual. Este estado de cosas, en crudo contraste con el florecimiento de la axiomática en la matemática, recomienda promover la perspectiva axiomática en la física aunque sólo sea para ver qué es lo que puede venir de ella. El resto de este capítulo tratará de sugerir cómo este proyecto —el examen o revisión axiomático de la física teórica— puede llevarse a efecto del mejor modo posible.

4. CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LA AXIOMÁTICA

La diferencia entre una presentación intuitiva o heurística de una teoría, y su formulación axiomática, es similar a la diferencia entre el desarrollo real de una pieza de investigación y un informe final sobre la misma. Es una diferencia en sistematicidad y en prioridades y, por consiguiente, también en claridad. Esto es cuanto es la axiomática, por difícil que su realización pueda resultar en la mayoría de los casos. En efecto, *axiomatizar un cuerpo de conocimiento no es sino exhibir sus principales ideas de modo ordenado.*

Ahora bien, el término "idea" designa a la vez conceptos y enunciados. Un concepto, tal como el de intensidad del campo eléctrico, es una unidad que interviene en algún enunciado, tal como "La intensidad del campo tiende a cero con la distancia". Consiguientemente, la axiomatización de una teoría consiste en delinear ordenadamente una lista de los principales conceptos y a la par los principales enunciados de la teoría, de modo tal que todos los restantes conceptos y enunciados de la misma sean derivables de esas ideas principales.

Una idea principal o básica es aquella que sirve para construir otras ideas por medios puramente lógicos o matemáticos: es o un concepto usado (habitualmente con la cooperación de otros conceptos) para definir algunos otros conceptos, o un enunciado usado (usualmente conjuntamente con otros enunciados) para deducir algunos enunciados adicionales. Los conceptos básicos de una teoría se denominan conceptos *primitivos* o *indefinidos*, mientras que los enunciados básicos se llaman *axiomas* o *postulados* de la teoría. (En la axiomática moderna, no se hace ninguna diferencia entre "axioma" y "postulado".) Así, los cuatro conceptos de intensidad e inducción de campo (o, equivalentemente, los dos tensores de campo correspondientes) son básicos o indefinidos en la versión del electromagnetismo clásico del propio Maxwell, mientras que las ecuaciones de Maxwell están entre los axiomas de esta teoría. Todo lo que ello significa es que, en esta formulación particular de la teoría de Maxwell, tales conceptos figuran entre las unidades básicas a partir de las cuales se construye la totalidad de la teoría. El concepto de densidad de energía, sin duda importante, no es lógicamente básico porque puede ser

definido en términos de esos primitivos; y el concepto de energía total es aún más derivado, dado que puede ser definido en términos de densidad de energía. Asimismo, la ley de conservación de la energía de campo es importante pero no básica, puesto que constituye un teorema implicado por esos axiomas.

Por alto que sea el status de concepto primitivo o de axioma, no es absoluto sino que depende del contexto. Así, el concepto de número es un primitivo en la aritmética elemental tal como el concepto de fuerza es uno de los primitivos de la mecánica newtoniana de partículas. Pero en teorías diferentes los números se definen en términos de conjuntos, y el concepto de fuerza es definible a menudo en términos del concepto de potencial. Consecuentemente, algunos enunciados se degradan, en teorías diferentes, del rango de axiomas al de teoremas. Esta contextualidad o relatividad del status de la idea básica es bien venida pues nos permite buscar ideas aún más potentes y ricas: conceptos más ricos y postulados más ricos a partir de los cuales poder derivar ideas básicas. Consiguientemente, la sentencia "El concepto (o el axioma) *A* es básico" debería relativizarse a "El concepto (o el axioma) *A* es básico en la teoría *T*".

Podría pensarse, sin embargo, que puesto que todos los conceptos y todos los enunciados de una teoría son o pueden necesitarse, todos ellos son igualmente importantes: que el investigador debe preferir la democracia de las ideas a su estratificación en ideas de primera clase e ideas de segunda clase. Así es, en efecto, desde un punto de vista semántico, esto es, en lo que respecta al significado y la verdad. Así, el concepto de flujo de campo es no menos importante que el concepto de intensidad de campo aun si el primero es definible en términos del último; más aún, los flujos son más importantes que las intensidades en la física experimental. Y las ecuaciones de campo son no menos importantes que los principios variacionales que implican a aquéllas que, después de todo, pueden considerarse como conveniencias heurísticas y matemáticas. Pero todo esto está fuera de cuestión: Con toda su importancia física, una idea derivada (un concepto definido o un enunciado derivado) es lógicamente secundario. La distinción básico/derivado es puramente lógica. Más aún, es una distinción útil aun si es relativa al contexto, pues nos empuja a buscar las ideas centrales, a marcar las ideas lógicamente más potentes, y nos ayuda a

evitar la caída en círculos. Así, quienquiera se atenga a esta distinción se abstendrá de intentar definir todo concepto (definicionismo) y probar todo enunciado (demostracionismo). Volveremos sobre esto en el capítulo 8.

Estamos ahora en posición de ofrecer una caracterización un tanto más precisa de la axiomática. Axiomatizar una teoría es establecer un conjunto de suposiciones iniciales tales que (*a*) den una caracterización suficiente de todos los conceptos básicos de la teoría, y (*b*) produzcan todos los enunciados (fórmulas) standard de la teoría. Pero antes de escribir cualquier suposición semejante necesitamos un lenguaje para expresarla. Por consiguiente, debemos empezar por echar una ojeada al trasfondo lógico y matemático de una teoría física.

5. El trasfondo formal

Hay sola teoría que arranca desde el comienzo: la lógica matemática (que en realidad es un conjunto de teorías). En efecto, las verdades de la lógica o tautologías –tales como "$A \Rightarrow (B \Rightarrow A)$"– son las que pueden demostrarse sin recurrir a otras suposiciones que las reglas de la lógica. Todas las teorías restantes presuponen, al menos, la lógica y, usualmente, bastante más. Más precisamente, lo mínimo que una teoría matemática o científica toma por supuesto es el cálculo de predicados ordinario (bivalente) enriquecido con la microteoría de la identidad. Esta teoría es necesaria y suficiente para analizar los conceptos, fórmulas y razonamientos que se presentan en matemáticas y en la ciencia –o, más bien, analizar su forma. En efecto, todo enunciado matemático o de las ciencias factuales es, en lo que a su forma concierne, una fórmula de ese cálculo; y todo razonamiento válido es un caso particular de una pauta inferencial consagrada por la misma teoría. No es que el razonamiento científico precise, de hecho, de la lógica para seguir adelante: la lógica no construye nada fuera de ella misma, y sólo interviene para controlar la validez de todo lo que se construye con conceptos. Tampoco quiere decirse que la investigación matemática y científica eviten los argumentos analógicos e inductivos que puedan ser fructíferos, aun si son siempre inválidos. Lo que se da a entender es que no cabe esperar que ninguna teoría conva-

lide los razonamientos no deductivos, aun si sus conclusiones pueden ser verdaderas.

Además del cálculo ordinario de predicados, hay otras muchas teorías lógicas, tales como la lógica modal, y las lógicas polivalentes, pero la lógica que se halla incrustada en la mayor parte de las matemáticas y en toda la física es la primera. (La excepción la constituye la matemática intuicionista, que cubre sólo una reducida porción de la matemática y carece, por tanto, de interés para la física.) Es menester recordar esta trivialidad en vista de la pretensión de que la teoría cuántica usa una lógica propia, en la que fallan las leyes distributivas de las proposiciones. Si eso fuese verdad, entonces la teoría cuántica poseería un formalismo matemático enteramente diferente y sería imposible unirla a la física clásica, como de hecho hacemos siempre que dejamos de cuantizar un campo externo o cuando interponemos algún resultado experimental —v. g., el valor de una constante— obtenido con la ayuda de mediciones diseñadas e interpretadas con la ayuda de la física clásica. En resumen, ni siquiera la revolución cuántica ha cambiado nuestra lógica (Bunge, 1967a; Popper, 1968; Fine, 1968).

La lógica ordinaria es, pues, el primer componente del trasfondo formal de cualquier teoría física. Su segundo y último componente es, por supuesto, la colección de teorías matemáticas que de hecho se emplean en la teoría física dada. (V. g., el álgebra elemental y el cálculo vectorial en el caso de la estática.) A su vez, la base o supuesto matemático de todas las teorías matemáticas hasta aquí empleadas en la física es la teoría de conjuntos. (Las excepciones son las llamadas teorías elementales, tales como la teoría elemental de los grupos.) En efecto, casi todo concepto matemático puede ser definido, por tortuoso que sea el camino, en términos de las nociones básicas de conjunto y pertenencia a un conjunto. Pero, para mejor o peor, al igual que en el caso de la lógica, hay diversas teorías de conjuntos no equivalentes. ¿Cuál elegiremos para construir las teorías físicas? Seguramente, la mayoría de los físicos no enfrentan este *embarras de choix*, pero el investigador en fundamentos sí. En efecto, no se trata sólo de si le gusta adoptar la versión de la teoría de conjuntos matemáticamente más satisfactoria (suponiendo que haya una). El investigador en el campo de los fundamentos de la física se ocupa también de elegir la teoría de conjuntos que le posibilite elucidar conceptos físicos del modo más

natural. Así, si se ocupa de alguna característica de un sistema multicomponente, tal como un haz luminoso que atraviesa un medio transparente, puede tener que concebir el sistema como un par ordenado (si, en efecto, el orden es esencial), de suerte que la característica en cuestión se formalice como función sobre el producto cartesiano de 2 conjuntos. (Por ejemplo, el índice de refracción es una propiedad conjunta de la luz y el medio óptico, y puede ser analizada como una función real definida sobre el conjunto de pares haz luminoso —punto en un medio óptico.) Pero entonces, dado que tanto el sistema compuesto como cada uno de sus componentes son cosas, el investigador en fundamentos puede sentirse insatisfecho con la construcción standard de un n-tuplo como conjunto de conjuntos: puede preferir interpretarlo como un individuo con plenos derechos. Por consiguiente, de entre todas las teorías de conjuntos axiomáticas en competencia, probablemente prefiera la versión de Bourbaki.

En resumen, la axiomática física presupone a la vez la lógica y la matemática, o, más bien, aquellas partes de la lógica y la matemática que han sido explotadas hasta ahora en la física. Este aparato formal es necesario para la reconstrucción ordenada de las teorías físicas pero no basta para este fin, pues mantiene silencio en lo relativo al significado físico. Debemos, por consiguiente, aportar otros aspectos al trasfondo de una teoría física.

6. EL TRASFONDO FILOSÓFICO

La investigación científica comporta ciertas ideas que no se elucidan ni por la ciencia formal (la lógica y la matemática) ni por ninguna ciencia empírica. En particular, la reconstrucción axiomática de una teoría científica presupone un número de conceptos e hipótesis que, aunque lejos de ser puramente formales o sintácticos, son harto generales e importantes como para ser propiedad privada de cualquier ciencia particular. Se trata de ciertas ideas filosóficas, tales como las de significado y verdad, y ciertas ideas protofísicas, tales como las de sistema y tiempo. Empecemos con las primeras, dejando la protofísica para la sección siguiente.

Consideremos los siguientes enunciados:

$S1$ El valor $X(\pi, k, t)$ de la función coordenada material X *representa* la posición de la partícula π en (o relativa a) el marco de referencia k en el instante t.

$S2$ Para toda partícula π hay un séptuplo $\mu = \langle M, X, P \rangle$ *denominado* punto de masa, donde M *designa* la masa, X la posición, y P el impulso de π, tal que $\mu \triangleq \pi$ (léase "μ *modeliza* π").

$S3$ El modelo de punto material *vale aproximadamente* para las partículas clásicas pero es *casi falso* para los sistemas cuánticos.

Ninguna de las palabras en cursiva pertenece a la lógica, matemática, o ciencia factual: son todas *términos semánticos*. Y los tres enunciados son *enunciados semánticos*, pues se ocupan del significado de ciertos símbolos o verdad de ciertas ideas. La semántica, a su vez, es una vieja rama de la filosofía —rama, empero, que ha hecho los más dramáticos avances desde comienzos de este siglo en que fue abordada por lógicos y matemáticos tales como B. Russell, R. Carnap, y A. Tarski y sus seguidores. (Cf. Bunge, 1974a y 1974b.)

El enunciado $S1$ anterior cumple dos tareas. De un lado, funciona como regla de designación o nominación, apuntando a la contrapartida física de un símbolo. De otro lado, $S1$ va más allá de una mera convención lingüística, pues expresa la idea de que la posición de una partícula es plenamente descrita o representada por una función vectorial real definida sobre el conjunto $\Pi \times K \times T$ de ternas: partícula-marco de referencia-instante. Esta suposición podría ser falsa: no se hacía cuando la gente creía en el espacio absoluto. Más aún, la suposición no tiene sentido para el operacionalismo, que requiere que K represente al conjunto de observadores más que al conjunto de marcos físicos de referencia, y que remplazaría el concepto de posición por el concepto de valor medido de la posición. Finalmente, $S1$ carece de objeto en la mecánica cuántica salvo para la posición promedio de un sistema. En resumen, aunque $S1$ es una suposición semántica, no es totalmente convencional —es una hipótesis más que una regla. Y en todo caso no es una suposición matemática ni física, sino semántica. Argüiremos en las secciones 9 y 10 que los sistemas de axiomas físicos contienen tales suposiciones semánticas en su misma base.

La segunda suposición semántica, $S2$, es la conjunción de una definición (la del concepto de punto material), tres reglas de designación (una para cada coordenada del 7-tuplo en cuestión) y una suposición —a saber, la hipótesis de que un punto material representa una partícula más que, digamos, un campo, o un acto de medición, o un fragmento de información.

Finalmente, el tercer enunciado, $S3$, resume la performance del modelo de punto material en términos de su grado de verdad. A diferencia de $S1$ y $S2$, $S3$ no es una suposición sino el resultado de un examen crítico de la mecánica de partículas en lo que respecta a su capacidad para representar verídicamente las vicisitudes de las partículas físicas. No obstante, el estudio de los enunciados del tipo $S3$ concierne no sólo a la física (o, más bien, a la metodología y metateoría de la física) sino también a la semántica, pues estos enunciados implican la noción semántica de verdad factual parcial. (Para la semántica de la ciencia, véase Bunge, 1972b, 1974a, 1974b.)

Consideremos ahora estos otros enunciados:

$M1$ Hay *objetos físicos* —esto es, objetos cuya existencia y propiedades no dependen de ser percibidos, pensados o medidos.

$M2$ Todo objeto físico encaja en algún conjunto de *leyes físicas* —esto es, pautas estables objetivas.

$M3$ Es posible *conocer*, siquiera sea sólo tentativa, aproximadamente, las leyes físicas al mismo tiempo que algunas de las idiosincrasias de objetos físicos individuales.

Estos tres enunciados son de naturaleza *metafísica*: formulan pretensiones acerca de la existencia del mundo externo, su legalidad, y su cognoscibilidad. Ninguno de estos enunciados es suficientemente específico para ocuparse de una teoría física determinada. Ninguno de ellos puede ser refutado teórica o empíricamente: sólo pueden ser confirmados —en efecto, todo proyecto de investigación exitoso refuerza las anteriores hipótesis metafísicas mientras que no se les reprochará ningún fracaso. Es más, son condiciones necesarias para la mismísima acometida de cualquier empresa de investigación en la ciencia factual. Pues, si no hubiera objetos físicos, no nos molestaríamos en in-

vestigarlos; si se comportaran de modo errático no trataríamos de encontrar sus leyes; y si fuesen impenetrables a nuestro esfuerzo cognoscitivo no perderíamos nuestro tiempo con ellos. En resumen, las anteriores son *presuposiciones metafísicas* de la investigación física. Más aún, casos específicos de $M1$ —v. g., "Hay campos gravitacionales"— pertenecen a la reconstrucción axiomática de las teorías físicas, como veremos en el capítulo 8.

En suma, tanto la investigación como los productos terminados de la investigación en las ciencias físicas presuponen un número de hipótesis metafísicas, todas las cuales merecen ser descubiertas, reunidas, sistematizadas y analizadas en lo que puede llamarse la *metafísica de la ciencia*. El hecho de que la ciencia presuponga alguna metafísica no tiene por qué preocuparnos sino que debería más bien motivarnos a la búsqueda de sistemas coherentes, claros y fértiles de metafísica —y, más aún, sistemas capaces de ayudar a la investigación científica antes que de obstaculizarla con prohibiciones superprudentes y principios superpermisivos. Si no llevamos a cabo esta tarea, entonces los metafísicos de estilo tradicional o especulativo la estropearán. En todo caso, no hay modo de evitar la metafísica. (Más sobre el asunto en Bunge, 1972a, 1977.)

En conclusión, las teorías físicas presuponen e implican un número de ideas semánticas y metafísicas. Ciertamente, la mayoría de estas ideas no han sido suficientemente elucidadas: la semántica y la metafísica de la física están aún en fase de cocción. Pero hay más de una razón para mantener el horno caliente —siempre que el horno esté equipado con luz y ventanas.

7. PROTOFÍSICA

Junto a los componentes formal y filosófico del trasfondo de una teoría física podemos discernir un tercer componente de la misma: la protofísica. Este campo está constituido por un número de principios y teorías concernientes a rasgos muy generales de los sistemas físicos —tan difundidos, en efecto, que la protofísica es una rama especial de la metafísica exacta.

Una de las teorías de la protofísica es la *mereología*, o la parte ele-

mental de la teoría general de sistemas. El objetivo de la mereología es elucidar de modo sistemático, esto es, estableciendo una teoría, o más bien un conjunto de teorías, las nociones básicas de sistema y formar parte de un sistema —o constituir un sistema sea por yuxtaposición (adición física $\dotplus$) o por interpenetración o superposición (producto físico $\dot{\times}$). Es obvio que se precisa una teoría tal para introducir de modo claro las propiedades no emergentes o hereditarias de las totalidades. Así, la carga eléctrica $Q(x \dotplus y)$ de un sistema compuesto de dos cuerpos x e y será la suma de sus cargas individuales, mientras que la energía total de dos campos lineales superpuestos —esto es, del sistema compuesto $x \times y$— equivale a la suma de sus energías individuales. Una elucidación posible de los conceptos básicos viene dada por una interpretación física de un álgebra booleana (Bunge, 1967a); otra, es un modelo de la teoría de anillos (Bunge, 1972a).

Una vez que se dispone de conceptos claros de sistema simple y de sistema complejo, podemos introducir el concepto de propiedad física, elucidándolo como aplicación (función u observador) sobre el conjunto de todos los sistemas de un tipo. De este modo se evita la noción fantasmagórica de propiedad física que no sea poseída por una cosa física y, junto con ello, el análisis errado de las propiedades cuantitativas como números. Podemos luego proceder a definir la noción de estado de un sistema como un punto en un cierto espacio (el espacio de los estados) asociado con él. Se hace posible entonces representar un acaecimiento como un par ordenado de puntos en el espacio de los estados. Claro es, un proceso será entonces definible como secuencia de acaecimientos, esto es, como trayectoria en el espacio de los estados (Bunge, 1968b).

Después de haber elucidado los conceptos de cosa (sistema) y sus cambios (acaecimientos) podemos proceder a construir varias ideas relacionales del espacio y tiempo físicos. El mejor modo de hacerlo es, desde luego, proceder axiomáticamente. Así, una geometría física métrica puede construirse especificando las condiciones que debe satisfacer una función de distancia definida sobre el producto cartesiano del conjunto de puntos físicos por sí mismo —caracterizando el punto físico como aquel en el que no desaparece toda propiedad física. Asimismo, los fundamentos de una teoría del tiempo pueden consistir en un manojo de axiomas para la duración, concebida como una función

real definida sobre el conjunto de triples: acaecimiento-acaecimiento-marco de referencia (Bunge, 1968d).

Al igual que con sistema, propiedad, acaecimiento, espacio, y tiempo, así con otros conceptos protofísicos (o metafísicos), tales como los de causación y probabilidad física. Todos pueden ser elucidados con la ayuda de unas pocas nociones lógicas y matemáticas, y su elucidación proporciona una fundamentación clara (bien que de ningún modo perfecta) de la física. En verdad, la física no espera a semejante elucidación para empezar; es más, la protofísica no pudo haber empezado hasta que la física se encontró ya en camino. Del mismo modo, el cálculo infinitesimal empezó mucho antes de poder recibir una fundamentación rigurosa —o, más bien, mucho más rigurosa aunque no definitiva— con ayuda de la teoría de conjuntos, el álgebra y la topología. No obstante, semejante trabajo fundacional fue necesario a fin de impedir catástrofes, aportar unidad y con ello facilitar el desarrollo del análisis. Aun si la protofísica no aportara nada sino alguna clarificación debiera ser bienvenida o al menos tolerada.

Resulta entonces claro que toda teoría física presupone ideas que no son objeto de la física: (*a*) los supuestos formales (lógica y matemáticas), (*b*) los supuestos filosóficos (semántica y metafísica), y (*c*) la protofísica (la teoría básica de sistemas, las teorías generales del espacio y tiempo, la teoría de la probabilidad física, etc.).

Algunas teorías físicas presuponen también una o más teorías físicas específicas. Así, la física del estado sólido toma por supuesto la mecánica cuántica, la teoría electromagnética clásica, y la mecánica estadística: es una aplicación de estas teorías, las que a su vez pueden considerarse como fundamentales en diversos grados. Una teoría física estrictamente *fundamental* no es la que está libre de supuestos sino la que no presupone ninguna otra teoría física. La mecánica clásica y la electrodinámica cuántica son ejemplos de teorías fundamentales. El objeto de hacer tal distinción entre teorías fundamentales y no fundamentales es evitar el girar en torno a círculos como tratar de deducir la teoría electromagnética de la ley de Coulomb en conjunción con la relatividad especial, que de hecho, se basa en la teoría de Maxwell.

Con ello concluimos nuestra rápida revista del trasfondo de una teoría física. Procedamos ahora a examinar la noción de concepto primitivo.

8. PRIMITIVOS

Los bloques de construcción de una teoría axiomática son, desde luego, sus conceptos primitivos o indefinidos. (Recuérdese la sección 4.) Los primitivos empleados en la construcción de un sistema de axiomas se pueden clasificar en *genéricos* y *específicos*. Los primeros intervienen en diversas teorías pertenecientes a diferentes campos mientras que los últimos caracterizan a la teoría particular en cuestión. Así, la noción genérica de estado y el concepto específico de entropía son conceptos indefinidos de la termodinámica. Una teoría física puede obtener sus primitivos genéricos de trasfondo en la esperanza de que alguien cultive esta tierra. En todo caso, no se espera que una teoría física particular elucide ningún concepto físico genérico.

El punto de partida de un sistema de axiomas físico es entonces un conjunto de *primitivos específicos*, esto es, de conceptos indefinidos que conciernen al tipo particular de sistema estudiado por la teoría, que, consecuentemente, no son elucidados por ninguna de las teorías que estructuran los supuestos formales, filosóficos o protofísicos de la teoría particular en cuestión. No obstante, es conveniente a menudo transportar algunos de estos conceptos protofísicos al frente y tratarlos en pie de igualdad con los primitivos específicos de la teoría. Hay tres buenas razones para incluir estos conceptos en la base primitiva de cualquier teoría física que haga uso de ellos. En primer lugar, en provecho de la unformidad: en este sentido todas las "variables" (de hecho, conjuntos y funciones) de la teoría a las que se asigna significado físico se catalogan y elucidan en alguna medida, y así se las reglamenta y vigila. En segundo lugar, porque teorías diferentes pueden necesitar conceptos diferentes de espacio y tiempo —y algunas ningunos. (La estática es una teoría atemporal mientras que la teoría de las redes eléctricas es una teoría aespacial.) En tercer lugar, porque la protofísica es una tierra de nadie, de suerte que los conceptos protofísicos quedan a menudo ocultos por una niebla que sólo puede ser iluminada si los escrutamos con suficiente frecuencia.

Acordemos entonces llamar *base primitiva* de una teoría física el manojo de conceptos indefinidos de la misma, a los que se asigna un significado físico y que figuran en las suposiciones físicas de la teoría.

Así, la base de la óptica geométrica consiste de tres conjuntos y una función: el espacio tridimensional euclídeo, los rayos de luz, los medios transmisores, y el índice de refracción. La función de los axiomas de la óptica geométrica es caracterizar, a la par formal y semánticamente, los cuatro primitivos y encolarlos en la ley básica de la teoría, a saber, el principio de Fermat. Y semejante caracterización (no definición) de los conceptos fundamentales y los enunciados fundamentales de una teoría física tiene el mismo objetivo último que la correspondiente formulación preaxiomática (o ingenua), a saber, describir ciertas entidades físicas y explicar y predecir su comportamiento. Sea o no, pues, axiomática, el propósito de una teoría física es diferente del propósito de una teoría en matemática pura; donde la primera describe, la última define. Así, mientras que los axiomas de la teoría de los retículos definen e incluso crean la categoría íntegra de los retículos, los axiomas de la óptica geométrica intentan reflejar cosas que no pueden ser definidas, a saber, sistemas ópticos. En este punto, la axiomática física abandona la compañía de la axiomática matemática.

Los formalistas alegarían que, puesto que la matemática se basa en la teoría de conjuntos, habría que considerar sólo conceptos conjuntistas en la construcción de una teoría científica. Y, más aún, dado que todo concepto físico posee la estructura de un objeto teórico conjuntista, sostendrían que no hay primitivos físicos y, consecuentemente, diferencias entre una teoría matemática y otra física (Suppes, 1967). Según esto, una teoría física con sólo dos conceptos básicos, tales como un conjunto X y una función F sobre y en X, no tendría primitivos propios, puesto que la teoría de conjuntos se cuida de X y F. Pero esto es como suponer que las matemáticas carecen de objeto propio pues, al fin y al cabo, toda fórmula matemática es una fórmula del cálculo de predicados. La teoría de conjuntos caracteriza ciertas nociones muy generales, tales como las de función, mientras que las teorías matemáticas específicas caracterizan nociones específicas, tales como las de medida aditiva y función seno, sobre las que la teoría de conjuntos nada sabe en particular. Algo similar rige, *a fortiori*, para los conceptos básicos de la física: aun cuando se espera que las matemáticas revelen su estructura formal, su significado físico rebasa las matemáticas y debe ser especificado por la física. Seguramente,

los conceptos (no relativistas) de masa y carga eléctrica son matemáticamente idénticos, y también los de las coordenadas espaciales y temporales, pero su contenido es netamente diferente. En conclusión; (*a*) el formalismo no rinde justicia a los conceptos físicos, que no son formas vacías, por lo que (*b*) a diferencia de una teoría matemática, una teoría física requiere suposiciones semánticas que relacionen sus símbolos con algunos de los entes en la realidad física y sus propiedades. (Recuérdense los capítulos 3 y 4. Más sobre el formalismo en Bunge, 1972a, 1974a, 1974b.)

9. AXIOMAS

El problema de caracterizar un concepto físico básico o indefinido es entonces doble: tanto la forma como el contenido del concepto deberían especificarse o al menos esbozarse. En una teoría axiomática semejante especificación es tarea de los axiomas. Los axiomas deberían determinar el status matemático de todo primitivo (conjunto, variedad diferenciable, espacio de Hilbert, o lo que sea), esbozar su contenido físico y relacionar todo primitivo con algunos otros conceptos de la teoría de modo tal que den cuenta de los principales rasgos del sistema físico en cuestión.

Los axiomas de una teoría física deberían cumplir tres funciones: una función formal o matemática, una función semántica, y una función propiamente física. En otras palabras, todo sistema de axiomas físicos bien construido contendrá postulados de tres (y sólo tres) tipos:

(1) Suposiciones *formales* (matemáticas), o resumidamente *SM* —v. g., "P es una medida de probabilidad en el conjunto S^2 de todos los pares ordenados de elementos del conjunto S".

(2) Suposiciones *semánticas* (significado), o *SS* —v. g., "Si el par ordenado $\langle s, s' \rangle$ está en S^2, donde S es el espacio de los estados del sistema, entonces $P(\langle s, s' \rangle)$ representa la intensidad de la tendencia del sistema a ir del estado s al estado s'".

(3) Suposiciones *físicas*, o *SF* —v. g., "$P(\langle s, s' \rangle) = P(\langle s', s \rangle)$".

De los tres grupos de axiomas el tercero, constituido por las suposiciones físicas, forma el corazón de cualquier teoría física. En efecto, mientras que los axiomas formales conciernen a la forma de los conceptos básicos y los axiomas semánticos cuidan de su significado, las suposiciones físicas se refieren a los sistemas físicos —que, después de todo, son la *razón de ser* de la teoría. A su vez, los más importantes con mucho de entre los axiomas físicos son los que tratan de representar leyes físicas objetivas. Las restantes suposiciones físicas, en particular, las fórmulas sobre vínculos y condiciones de contorno, aun cuando lógicamente independientes de los enunciados legales, son subsidiarias de aquéllas: son sólo restricciones ulteriores a las diversas variables y funciones interligadas por los enunciados legales. Un sistema de axiomas que no posea, al menos, un enunciado legal no es una teoría física.

¿Qué suposiciones físicas habría que postular en una teoría? Claramente, aquellas y sólo aquellas fórmulas que no pueden probarse dentro de la teoría dada y, sin embargo, se suponen o, al menos, se espera sean verdaderas con alguna aproximación. No se postulará una ecuación de movimiento, o una ecuación de campo, si se puede derivar de alguna suposición más fuerte, v. g., un principio variacional, particularmente si este axioma más fuerte entraña también consecuencias adicionales —v. g., ecuaciones de conservación. Ni qué decir tiene, por "derivación" o "prueba" entendemos una operación puramente conceptual —un razonamiento— por el que la conclusión deseada se sigue de un conjunto de premisas en virtud de reglas de inferencia de las teorías lógicas y matemáticas subyacentes.

En particular, no nos propondremos probar en una teoría, por ejemplo, de los *quark*, que hay *quarks*: semejante "prueba" de existencia, o, más bien, sugerencia, se suministra mostrando que hay algo que parece satisfacer ciertas suposiciones de una teoría de los *quarks*. Y este proceso de verificación involucra a la teoría en cuestión, aliada con otras varias teorías, pero que no pertenecen a aquella. Con todo, siempre que y cuando se haya pasado semejante contrastación empírica, ciertos teoremas de la teoría pueden apuntar a la posible existencia de propiedades hasta entonces insospechadas de los referentes de la teoría. En resumen, *en* una teoría sólo pueden probarse o no teoremas. Todo lo que pueda probarse o hacerse plausible *acerca de* una

teoría física queda así fuera de la teoría: bien con ayuda del experimento, bien dentro de la metateoría de la teoría dada —como en el caso de una prueba de coherencia.

En cualquier caso, si deseamos probar mucho debemos construir suposiciones fuertes. (Más sobre la cuestión en el capítulo 8, sección 3.) Ello no nos comprometerá a creer en todas ellas, ni siquiera en ninguna: nos comprometerá sólo a las consecuencias lógicas de esas suposiciones con tal que afirmemos éstas. Si algunas de estas consecuencias entran en conflicto con otras ideas aceptadas (datos o teorías), rechazaremos sin remordimiento algunos de los axiomas —precisamente los axiomas que implican las consecuencias erróneas. Éste es, desde luego, un enunciado normativo más que descriptivo: a menudo nos comportamos inconsistentemente, haciendo reparaciones a nivel de teoremas (v. g., introduciendo cortes o *cut-offs* a última hora) en lugar de corregir los postulados.

En particular, debemos hacer fuertes suposiciones de existencia, aunque sólo sea para verlas refutadas por la observación. Así, si la teoría se refiere a ciertas entidades que se nos ocurre bautizar por gusto "caprichones", nos vemos obligados a partir de la hipótesis fuerte de que *hay* caprichones, aun si no hay prueba experimental de ellos. De lo contrario, esto es, si el conjunto de caprichones se considera, desde el principio, vacío, la teoría será verdadera vacuamente, pues puede predicarse cualquier cosa de entidades inexistentes. Más precisamente, el mismísimo primer axioma de nuestra teoría del caprichón habrá de leerse más o menos así: "(*a*) $F \neq \emptyset$. (*b*) Todo f en F representa un caprichón". Una vez que obtengamos consecuencias contrastables de semejantes axiomas fuertes, podemos esperar su comprobación por experimento. Si éste no exhibe (o más bien sugiere) caprichón alguno, o si no confirma que los caprichones poseen las propiedades que les asigna la teoría, ésta tendrá que rechazarse.

Mas una suposición de existencia física, aunque necesaria, es insuficiente: no puede siquiera ponerse a prueba a menos que la cosa que se está conjeturando reciba una descripción hipotética. Esto es, debemos formular suposiciones precisas acerca de las propiedades, constitución, y comportamiento de los referentes de nuestra teoría. Tales hipótesis son propiamente *suposiciones físicas*. Si generales y satisfactoriamente corroboradas se llamarán *leyes* o, mejor, *enuncia-*

dos legales, pues las leyes físicas mismas se supone que son las pautas objetivas que esas fórmulas intentan capturar. Así, en el caso de nuestros caprichones podemos postular, digamos, que *Cuantos más hay, tanto más Q-esinos devienen*, donde Q es una nueva propiedad original de los caprichones. No obstante, esta suposición física es excesivamente vaga, no sólo porque implica una nueva propiedad oscura Q sino porque se formula en lenguaje ordinario. Debemos comprometernos con hipótesis bien precisas, pues de lo contrario no estaremos diciendo nada definido y seremos incapaces de sugerir prueba alguna a favor o en contra de nuestras hipótesis. Supongamos que, entre las infinitas fórmulas matemáticas compatibles con la expresión del lenguaje ordinario dada, elegimos

SF_1 Para todo f en F: $dQ/dN=aN$, donde a es un real positivo.

Formalmente, esto es enteramente preciso pero semánticamente es indeterminado, por lo tanto empíricamente incontrastable, aunque sólo sea porque hay muchas cantidades que aumentan con la población total. Debemos ligar la nueva propiedad Q con alguna propiedad física bien conocida: sólo así podremos evaluar Q o incluso reconocer un caprichón. En general: *las hipótesis aisladas son incontrastables.*

Supongamos que nuestra teoría del caprichón hipotetiza una relación con un viejo conocido, la teoría de la radiación electromagnética, a saber, así: Los caprichones se alimentan de fotones. Una simple formulación matemática de esta conjetura, en términos de la densidad de energía ρ, de campo, es ésta:

SF_2 $dN/dp=b$, con b, real positivo.

Podemos probar ahora algunos teoremas y pedir al experimentador que los contraste. Pero esto sólo porque tácitamente hemos supuesto (*a*) ciertas propiedades matemáticas obvias de nuestras funciones básicas (v. g., diferenciabilidad), y (*b*) una asignación definida de significado físico a todo símbolo en nuestros axiomas. Ahora bien, rasgo de la axiomática es, precisamente, no dejar nada tácito, nada fuera de los axiomas. Por lo que nuestras suposiciones han de ser suplementadas con dos lotes adicionales de axiomas, uno de suposiciones matemáticas, otro semánticas. Procederemos a un análisis de es-

tos otros tipos de axiomas en la sección siguiente, pero no antes de cosechar algunas conclusiones generales.

Nuestra primera conclusión es que en axiomática, al igual que en la vida ordinaria, hay que arriesgar si queremos ganar algo: en otras palabras, no deberíamos temer a los axiomas fuertes siempre que sean contrastables y prometan explicar algo que antes no comprendíamos. En segundo lugar, no hay nada sagrado en los axiomas físicos: son sólo premisas a ser comprobadas tanto por sus consecuencias cuanto por su capacidad en encajar con algunas ideas aceptadas anteriormente. Incluso un resultado satisfactorio en tales contrastaciones no garantiza su eternidad, tal como el éxito en la vida no proporciona la inmortalidad.

10. Los ingredientes olvidados en las suposiciones formales y las suposiciones semánticas

Seguramente, la pulpa de una teoría física está constituida por sus suposiciones físicas. Consiguientemente, la meta de toda tentativa de axiomatización debería ser expresar aquellas suposiciones de modo coherente y transparente. Mas las suposiciones físicas carecen de sentido salvo cuando van acompañadas de suposiciones matemáticas y semánticas. En efecto, una fórmula es sólo una ristra de signos a menos que se especifique su naturaleza matemática y se diga algo, por muy esquemáticamente que sea, de las cosas y propiedades que los símbolos primitivos se supone representan. Así, en el ejemplo de comienzos de la sección anterior, la tercera fórmula sería ininteligible sin los enunciados precedentes, mientras que a su luz "dice" que las probabilidades de transición son simétricas o reversibles. Usualmente, el contexto suministra tal información pero no puede dejar de hacerlo de modo ambiguo. Puesto que un objetivo de la axiomática es suprimir ambigüedades, todo sistema de axiomas físicos debería incluir un enunciado explícito de todas las características formales y semánticas de los primitivos de que se ocupa. Cuanto más compleja una teoría tanto más explícitamente debería formularse a fin de evitar equivocaciones. Pero ello es posible sólo si se centra la atención en los fundamentos axiomáticos de la teoría.

Las suposiciones semánticas son los componentes más débiles de un sistema de axiomas, pues sólo cumplen parte de su tarea: trazan sólo un *perfil semántico* de los primitivos en lugar de comunicar su pleno contenido con exactitud. Los significados físicos son tan ricos y elusivos que apenas pueden ser capturados por una única sentencia. Afortunadamente, los otros componentes de una teoría —las suposiciones formales y las físicas— contribuyen a delinear el significado de los símbolos indefinidos. Así, en nuestro primer ejemplo, la suposición formal pone en claro que P es una propiedad de pares más que de individuos, sugiriendo con ello que P no está al mismo nivel que, digamos, la temperatura. En efecto, el argumento de P no es una variable que represente un sistema sino un par de estados de un sistema, de suerte que P es una especie de propiedad de segundo orden —a diferencia, digamos, de la masa, que, siendo una medida del conjunto de cuerpos, es una propiedad de individuos. En cuanto a la suposición física de ese ejemplo, ella justifica la interpretación de P como una probabilidad de transición o tendencia a cambiar de estado —de acuerdo con la interpretación objetiva o de la propensión defendida por Poincaré, Smoluchovski y Popper. En general, las suposiciones matemáticas y físicas justifican las suposiciones semánticas, que a su vez suministran el significado central de los primitivos —sin agotar, no obstante, su pleno significado. Déjese de lado uno de los tres componentes y nos quedará un inválido. (Las observaciones precedentes presuponen entender el significado de un signo como el par ordenado constituido por la connotación y la denotación de la idea que el signo sustituye: véase Bunge, 1972a, 1972b, 1974a, 1974b.)

Se notará que en nuestro primer ejemplo el símbolo "$P(\langle s, s' \rangle)$" se interpretó en términos de la sospechosa noción de tendencia o propensión más que con la ayuda de la noción clara de frecuencia relativa. Una primera razón de esta preferencia por el concepto físico de tendencia sobre el concepto estadístico de frecuencia es la siguiente. El número $P(\langle s,s' \rangle)$ concierne a un miembro arbitrario de una colección de transiciones de estado, mientras que la correspondiente frecuencia relativa concierne a la colección entera: es una propiedad colectiva (no hereditaria). Una segunda razón para no igualar probabilidades y frecuencias es que las últimas no satisfacen exactamente los axiomas de cálculo de probabilidades. Seguramente, si una determina-

da teoría probabilística es verdadera, entonces las frecuencias relativas observadas se aproximarán, a largo plazo, a las probabilidades calculadas. Pero los dos no *significan* la misma cosa. Las frecuencias relativas observadas proporcionan *estimaciones* numéricas de probabilidades pero no son los únicos estimadores y en todo caso no proporcionan el contenido de una fórmula probabilista, tal como las lecturas del reloj no proporcionan el significado del símbolo "*t*". El significado de un símbolo físico no debería confundirse con el valor numérico de la magnitud correspondiente según viene estimada por la observación —aunque sólo sea porque el diseño e interpretación requieren diversas teorías que están dotadas ya de significado.

Cuando los significados se confunden con los procedimientos experimentales o con sus resultados, la filosofía de la ciencia adoptada es el operacionalismo. Si, en cambio, el significado de un símbolo se entiende como la connotación (o conjunto de propiedades) del constructo que designa, junto con su clase de referencia propuesta o hipotética, entonces cabe adoptar consistentemente una filosofía realista. Mientras que la filosofía operacionalista se centra en el científico y en sus operaciones, la filosofía realista enfoca su atención en el propio objeto físico y es, por consiguiente, compatible con el objetivo de la ciencia física, que es descubrir cómo es el mundo, no lo que la gente parece estar haciendo —tarea ésta para las ciencias del comportamiento. En todo caso, la mera formulación de una suposición semántica, no puede dejar de revelar un compromiso con alguna teoría del significado. Vemos una vez más que, de tomar seriamente la axiomática, no puede eludirse la filosofía —que a su vez tiene que tomar en serio a la ciencia si quiere prestarle alguna ayuda.

Nos encontramos ahora en condiciones de inspeccionar algunos ejemplos de la axiomática física a la par que de evaluar las virtudes y limitaciones del enfoque axiomático. Estas tareas se emprenderán en el próximo capítulo.

Capítulo 8

EJEMPLOS Y VENTAJAS DE LA AXIOMÁTICA

Presentaremos ahora dos especímenes comparativamente simples de axiomática física. Hay que subrayar que éstos obligadamente difieren en importantes respectos de los sistemas de axiomas de la matemática pura. En efecto, mientras que los últimos *definen* familias enteras de objetos o estructuras *formales*, tales como retículas o espacios topológicos, nuestros sistemas de axiomas tratan de *caracterizar* (no definir) especies de objetos *concretos*, a saber, sistemas físicos, que supuestamente llevan una existencia independiente. Razón por la que, mientras el axiomatizador matemático urde su tejido sin preocuparse del mundo físico, el axiomatizador físico se encuentra pegado a tierra.

Esto es, mientras que la axiomática física puede tomar todas las ideas matemáticas que necesite, no puede, sin embargo, imitar en todo punto el estilo de axiomatización adecuado a las matemáticas puras, que desemboca en definir algún complejo predicado construido usualmente con componentes conjuntistas. Así, sería erróneo introducir el concepto de red eléctrica mediante una estipulación como ésta:

DEFINICIÓN: la estructura $\mathcal{G} = \langle G, T, V, e, i, R, C, L, M \rangle$, donde G y T son conjuntos, V, e, e i funciones sobre $G \times T$, R, C, y L funciones sobre G, y M una función sobre $G \times G$, es una *red eléctrica* si y sólo si (aquí viene una lista de axiomas que caracterizan el status y relaciones mutuas de los primitivos G, T, etc.).

Tal definición axiomática se calificaría de teoría *matemática*, no, ciertamente, muy interesante. Pero no se calificaría de teoría *física* porque puede ser satisfecha por un número cualquiera de objetos, for-

males o concretos, mientras que los circuitos eléctricos son una especie única y, más aún, una cuyos miembros están ahí en el mundo, no aquí en la mente. No inventamos sistemas físicos de la nada, al modo como los matemáticos inventan espacios. A diferencia de un espacio de Hilbert, una red eléctrica no se construye a partir de conceptos conjuntistas: no se define dentro de, o construye con la ayuda de, la teoría de conjuntos sino con una fuente de energía eléctrica, alambres, etc. Lo que mejor cabe hacer es dar una *descripción* de una red con la ayuda de conceptos y enunciados manufacturados cuidadosamente. Los matemáticos, acostumbrados a desempeñar el papel de Dios, pueden no gustar de este procedimiento y exigir que *definamos* sistemas físicos en términos puramente matemáticos sin mezcla de suposiciones semánticas que liguen estos términos a objetos externos. (Véase, v. g., Freudenthal, 1970.) Esta actitud refleja una filosofía platónica y un total malentendido en cuanto al objeto mismo de la teoría física. La meta de la axiomática física es, por el contrario, elucidar las peculiaridades de la teoría *física* en general, y las características principales de teorías físicas particulares. Y emplea instrumentos formales que se crean en otra parte: en la matemática pura. (Para otros contrastes véase Salt, 1971.)

Manos a la obra.

1. Un primer ejercicio de axiomatización: la teoría de redes

Vamos a axiomatizar la teoría de Kirchoff-Helmholtz de las redes eléctricas. Procederemos a catalogar las presuposiciones o trasfondos, los primitivos o bloques de construcción, y los axiomas o postulados.

Trasfondo formal: la lógica ordinaria (cálculo de predicados con identidad), la teoría de grafos, y el análisis matemático elemental, al igual que las teorías de conjuntos, algebraicas, aritméticas, y topológicas presupuestas por el análisis.

Trasfondo filosófico: la semántica (la teoría del significado y la verdad) y las presuposiciones metafísicas de la investigación científica (v. g., la independencia e inteligibilidad del mundo externo).

Trasfondo protofísico: la teoría elemental de los sistemas, la teoría elemental del tiempo universal, y el análisis dimensional.

Base primitiva: T (tiempo), G (grafo), V (potencial), e (f.m.e.), i (corriente), R (resistencia óhmica), C (capacidad), L (auto-inductancia), M (inductancia mutua).

1. *Axiomas sobre el tiempo*

(1a) T es un intervalo de la línea real (*SM*).

(1b) Todo miembro t de T representa un instante de tiempo, y la relación $\leqslant$ que ordena (parcialmente) T representa la relación de ser anterior a o simultáneo con (*SS*).

2. *Axiomas sobre la red*

(2a) $\{G\}$ es una familia no vacía de grafos dirigidos (*SM*).

(2b) Por cada red eléctrica, existe un miembro G de $\{G\}$ que representa (modeliza) a aquélla de modo tal que a todo terminal se asigna un vértice de G y a todo elemento se asigna un lado de G (*SS*).

3. *Axiomas sobre el potencial y la corriente*

(3a) e, V e i son funciones reales de variación acotada definidas sobre el conjunto de pares ordenados $\langle$ lado, $t \rangle$ *y son continuas respecto de t* (*SM*).

(3b) Si n es un lado de un grafo $G \in \{G\}$ que representa una red eléctrica, entonces $e_n(t)$ representa el voltaje impreso, $V_n(t)$ representa el potencial eléctrico, e $i_n(t)$ representa la intensidad de la corriente eléctrica en la $n$ésima rama de la red representada por el $n$ésimo lado de G (*SS*).

4. *Axiomas sobre los parámetros*

(4a) R, C y L son funciones reales de variación acotada sobre $\{G\}$ y M es una matriz cuadrada simétrica cada uno de cuyos elementos es una función real de variación acotada sobre $\{G\} \times \{G\}$ (*SM*).

(4b) Si n y p son lados de un grafo $G \in \{G\}$ que representa una red eléctrica, entonces R_n representa la resistencia óhmica, C_n representa la capacidad y L_n representa la auto-inductancia de la *enésima* rama

de la red mientras que M_{np} representa la inductancia mutua entre la e*n*ésima y la e*p*ésima ramas de la misma (*SS*).

5. *Axiomas sobre leyes*

Si $G \in \{G\}$ representa una red en equilibrio (estado estacionario), entonces:

(5a) En cada vértice de G la suma de las intensidades de las corrientes a lo largo de las ramas representadas por los lados que se encuentran en un vértice determinado es igual a cero (*SF*).

(5b) Para cualquier circuito de G, la suma de los potenciales de las ramas representadas por ese circuito es nula (*SF*).

(5c) Para un lado arbitrario n entre dos vértices a y b de G,

$$L_n(di_n/dt) + R_n i_n + (1/C_n)\int dt\, i_n + \\ + \sum M_{np}(di_p/dt) + e_n = V_n(a) - V_n(b) \; [SF]$$

Comentarios. (i) Nuestro sistema de axiomas contiene cuatro postulados más que los tres usuales —a saber, los enunciados legales (5a) hasta (5c). La función de nuestros axiomas adicionales 1 a 4 es armar el escenario para la aparición de los enunciados legales, que, en caso distinto, carecerían de sentido. En otras palabras, los axiomas 1 a 4 especifican la naturaleza —pero no las interrelaciones— de los nueve conceptos primitivos (indefinidos) de la teoría. Esta especificación es, a la vez, formal (matemática) y factual (física). La primera viene dada por los axiomas llamados *SM* (suposiciones matemáticas) mientras que el contenido viene esquematizado por los axiomas llamados *SS* (suposiciones semánticas). En una presentación heurística, estas suposiciones adicionales quedan insinuadas pero no formuladas explícitamente. (ii) En ocasiones, una teoría proporciona sólo un *lenguaje* conveniente (exacto o sugerente) —como es el caso con la teoría de la información en genética. Si ello es así, entonces esta teoría no es realmente una presuposición de la teoría científica dada, salvo quizás heurísticamente. En nuestro caso, la teoría de grafos proporciona a la vez un lenguaje y un cuerpo de teoremas que facilitan la búsqueda de demostraciones de los enunciados acerca de redes —por lo que la teo-

ría de grafos es un constituyente genuino del fundamento de la teoría de redes. (iii) Los segundos miembros de cada uno de los axiomas del grupo 1 a 4 contienen la palabra semántica clave "representa". Así, el Axioma (2b) no enuncia que una red eléctrica *es* un grafo dirigido sino que es *representada* o *modelizada* por éste. Las razones son las siguientes: (*a*) los grafos no son cosas sino ideas, y (*b*) un grafo dado cualquiera puede representar una clase entera de redes reales equivalentes. (iv) De no ser por el Axioma 4, los parámetros de los circuitos se considerarían como números. Este postulado enuncia que son propiedades físicas de las redes. Dado que es una teoría fenomenológica o de caja negra, no nos dice cómo surgen R, C, L, y M: esto es tarea para teorías de mecanismos como la de Maxwell, la electroquímica, y la teoría del estado sólido. (v) Las dos leyes de Kirchoff unen dos aspectos diferentes de una red: el topológico y el físico. Todavía cabe verlo mejor adoptando la representación matricial. En esta representación, las corrientes y potenciales en los diferentes lados se recogen matrices columna en i y V sobre las que opera la llamada matriz vértice A y la matriz circuito B respectivamente. En esta formulación, la leyes de Kirchoff se escriben: $Ai = 0$ y $BV = 0$, donde A y B resumen las características topológicas mientras que i y V son las variables físicas (Seshu y Reed, 1961).

2. SEGUNDO EJEMPLO: LA TEORÍA DE LA GRAVITACIÓN CLÁSICA

Axiomaticemos ahora la teoría de la gravitación de Newton-Poisson. Esto nos ayudará a comprender su relación con la mecánica clásica, con la que, a menudo, se confunde.

Trasfondo formal: lógica y análisis (teoría del potencial particularmente), al igual que las presuposiciones conjuntistas, algebraicas, aritméticas, y topológicas del análisis.

Trasfondo filosófico: las presuposiciones semánticas y metafísicas de la investigación científica.

Trasfondo protofísico: la teoría elemental de sistemas, el análisis dimensional, la teoría del tiempo universal y la geometría física euclídea.

Base primitiva: M^3 (variedad tridimensional diferenciable), T (tiempo), Σ (cuerpo), B (representante del cuerpo), K (marco de referencia), Γ (campo), U (potencial), X (posición de partícula), ρ (densidad de cuerpo), T (tensión mecánica), G (constante gravitacional).

Grupo de axiomas 1: espacio y tiempo

(1.1a) M^3 es un espacio métrico tridimensional con el tensor métrico g (SM).

(1.1b) M^3 representa el espacio ordinario (SS).

(1.2a) T es un intervalo de la línea real (SM).

(1.2b) Todo miembro t de T representa un instante de tiempo, y la relación $\leqslant$ que ordena (parcialmente) T representa la relación de ser previo a o simultáneo con (SS).

Grupo de axiomas 2: campo gravitacional

(2.1a) Γ es un conjunto no vacío (SM).

(2.1b) Todo $\gamma \in \Gamma$ es un campo gravitatorio (SS).

(2.2a) $\{U_\gamma\}$ es una familia no vacía de campos escalares sobre M^3 (SM).

(2.2b) Para todo $\gamma \in \Gamma$ hay un $U_\gamma \in \{U_\gamma\}$ tal que U_γ es una función real definida sobre $M^3 \times T$ (SM).

(2.2c) Todo $U_\gamma \in \{U_\gamma\}$ y sus derivadas de primer orden son continuas en M^3 (SM).

(2.2d) $-\nabla U_\gamma(x,t)$ representa la intensidad del campo gravitatorio $\gamma \in \Gamma$ en $x \in M^3$ y $t \in T$ (SS).

(2.3) G es un número real positivo (SM).

(2.4) Para todo $\gamma \in \Gamma$ y todo $\sigma \in \Sigma$, en cualquier punto $x \in M^3$, en cualquier instante $t \in T$ y en (relativo a) cualquier marco de referencia $k \in K$,

$$\nabla^2 U + 4\pi G\rho = 0 \quad (SF)$$

Grupo de axiomas 3: cuerpo y marco

(3.1a) Σ es un conjunto numerable no vacío disyunto de Γ (SM).

(3.1b) Todo $\sigma \in \Sigma$ es un cuerpo (SS).

(3.2a) B es una familia no vacía de conjuntos de puntos (SM).

(3.2b) Todo $b \in B$ es una variedad diferenciable tridimensional (*SM*).

(3.2c) Para todo $\sigma \in \Sigma$ existe un $b \in B$ tal que b representa (refleja, modeliza) σ punto por punto (*SS*).

(3.3a) K es un conjunto no vacío numerable incluido en Σ (*SF*).

(3.3b) La distancia entre dos puntos cualesquiera en cualquier $k \in K$ es constante (*SF*).

(3.3c) Ningún $k \in K$ interactúa con ningún $\sigma \in \Sigma$ que no forme parte de k (*SF*).

(3.3d) Para todo $k \in K$ existe en M^3 un sistema cartesiano de ejes ortogonales $e = \langle e_1, e_2, e_3 \rangle$ tal que $e \hat{=} k$ (esto es, e modeliza o refleja k) (*SS*).

(3.4a) $\{X\}$ es una familia no vacía de funciones vectoriales reales sobre $b \times K \times T$ (*SM*).

(3.4b) Todo $X \in \{X\}$ es de variación acotada para cualesquiera $b \in B$ y $k \in K$ (*SM*).

(3.4c) Si π es una partícula de σ, y si $\beta \in b$ y $\beta \hat{=} \pi$, entonces $X(\beta, k, t)$ representa la localización de π relativa al marco de referencia k en el instante t (*SS*).

(3.5a) $\{\rho\}$ es una familia no vacía de funciones (*SM*).

(3.5b) Todo $\rho \in \{\rho\}$ es una función de $b \times M^3 \times T$ al conjunto de reales no negativos, integrable de Lebesgue sobre cualquier región finita de M^3 (*SM*).

(3.5c) Si $\beta \in b$ y $\beta \hat{=} \pi$, entonces $\rho(\beta, x, t)$ representa la densidad de masa de σ en β, t (*SS*).

(3.6a) $\{\mathbf{T}\}$ es una familia no vacía de funciones (*SM*).

(3.6b) Todo $\mathbf{T} \in \{\mathbf{T}\}$ es una función tensorial real de valencia (2,0) sobre $b \times K \times M^3 \times T$ (*SM*).

(3.6c) Si $b \in B$ y $\sigma \in \Sigma$ y $\beta \in b$ y si π es una partícula de σ, y además $b \hat{=} \sigma$ y $\beta \hat{=} \pi$, entonces $\mathbf{T}(\beta, x, t)$ representa la tensión en la partícula π de σ (*SS*).

(3.7) Para todo $\gamma \in \Gamma$, todo $b \hat{=} \sigma$, todo $\rho \in \{\rho\}$, todo $X \in \{X\}$, todo $\mathbf{T} \in \{\mathbf{T}\}$, todo $x \in M^3$ y todo $t \in T$, existe al menos un $k \in K$ tal que

$$\rho \ddot{X} = -\rho \nabla U + \operatorname{div} \mathbf{T} \quad (SF).$$

Conceptos derivados

Df. 1. *Masa total*:

$$b \mathrel{\hat{=}} \sigma \Rightarrow M(\sigma, t) =_{\mathrm{df}} \int_{X(b,t)} d^3 x\, g^{1/2}\, \rho\,(b, x, t), \text{ con } g =_{df} Det\, g_{ij.}$$

Df. 2. *Densidad de la fuerza gravitacional* en σ relativa a $k \in K$:

$$f(\sigma, k) =_{\mathrm{df}} -\rho \nabla U\,.$$

Df. 3. *Marco inercial*: Todo marco de referencia tal que los 3 postulados sean satisfechos se denomina *marco inercial.*

Entre las infinitas consecuencias implicadas por el precedente conjunto de axiomas, mencionaremos sólo las siguientes.

Teorema 1. El potencial gravitatorio de una partícula puntual de masa M es

$$U(r) = GM/r.$$

Prueba. Póngase $\rho(r) = M\delta(r)/r^2$, donde δ es la delta de Dirac, en el axioma 2.4 y exprésese ∇^2 en coordenadas esféricas.

Corolario. La fuerza gravitacional ejercida sobre una partícula de masa m por el campo asociado a una partícula puntual de masa M es

$$F = GmM\,(X - r)/|X - r|^3.$$

Prueba. Por el teorema 1 y la Df. 2.

Teorema 2. La ecuación de movimiento de una partícula (sin spin) de masa m en el campo de una partícula puntual de masa M es

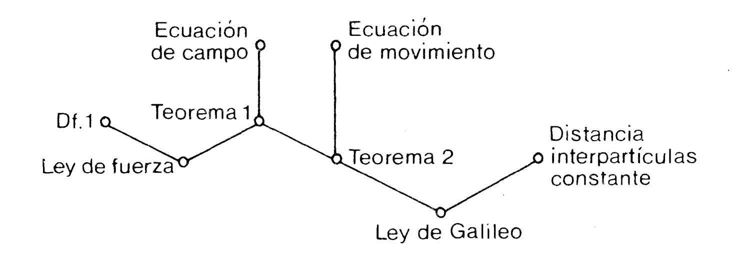
$$\ddot{X} = GM\,(X - r)/|X - r|^3.$$

Prueba. Remplácese el Teorema 1 en el Axioma 3.7, póngase $\mathbf{T} = 0$, y cancélese ρ.

Corolario. Bajo las condiciones del teorema 2 y para distancias interpartículas casi constantes,

$$\ddot{X} = g = \text{const.}, \quad \text{con} \quad g =_{\mathrm{df}} GM\,(X - r)/|X - r|^3.$$

Las relaciones lógicas entre las suposiciones físicas más comúnmente usadas y los resultados de esta teoría se exhiben en el siguiente árbol:



Comentarios. (i) El precedente sistema de axiomas contiene sólo cuatro suposiciones físicas: las concernientes a la rigidez y pasividad de los marcos de referencia (Axiomas (3.3b) y (3.3c) respectivamente), la ecuación de campo (Axioma (2.4)), y la ecuación de movimiento (Axioma (3.7)). Los 26 axiomas restantes son suposiciones matemáticas o semánticas. (ii) Incluso el Axioma (2.3) concerniente a la escala G del potencial gravitatorio, es una suposición matemática. En cambio, un enunciado concerniente a las dimensiones de G puede ser considerado como una proposición física, pues se sigue de los enunciados legales en conjunción con el análisis dimensional. Puesto que es un teorema, no necesita ser introducido en los fundamentos axiomáticos de la teoría. Y un enunciado concerniente al valor numérico preciso de G es un enunciado físico también, pero no sería una suposición, pues es implicado por las leyes en conjunción con fragmentos de información empírica (v. g., datos concernientes a la longitud y período de un péndulo). (iii) La ecuación de campo es formalmente idéntica con la ecuación clásica del campo electrostático —fuente, a menudo, de confusión para los estudiantes novicios. De no ser por las diferencias en las fuerzas ponderomotrices de los respectivos campos, seríamos incapaces de discernir entre estos dos campos. Ésta es una razón para incluir las ecuaciones de movimiento en la teoría. (iv) Las exposiciones elementales de esta teoría se restringen usualmente a la más famosa ley física, a saber, el Teorema 2, que vale sólo para partículas puntuales. Las tentativas de libro de texto, de obtener la ecuación general de movimiento (3.7), partiendo de un conjunto de partículas puntuales están condenadas al fracaso por obvias razones matemáticas. (v) La acción cinética de un campo gravitatorio es independiente de la masa sólo en el caso especial en que la tensión tiene una divergencia nula. Ésta, pues, es una de las restricciones bajo las que

un campo gravitatorio homogéneo y estático es equivalente a un marco de referencia acelerado. De no ser porque el valor de div **T** es a menudo enteramente despreciable, y, a menudo, despreciado por falta de información acerca de **T**, el principio de equivalencia (en rigor uno de los dos teoremas que toman este nombre en la relatividad general: véase Bunge, 1967a) podría no haber sido descubierto y podría no haber ayudado a la construcción de la teoría relativista de la gravitación. (vi) Según las ecuaciones de movimiento (Axioma (3.7)), el efecto cinético de la tensión interna, esto es, div $\mathbf{T}/\rho$, si es negativo, contrarrestará y excepcionalmente incluso equilibrará la acción ponderomotriz $-\nabla U$ del campo.

Los dos sistemas axiomáticos que acabamos de exponer deben bastar como muestra de la axiomática física según el espíritu de lo dicho en el capítulo 7. Para otros ejemplos en el mismo estilo, invitamos al lector a consultar (Bunge, 1967a).

3. La técnica de axiomatización

No hay técnicas para construir teorías *ab initio.* Consiguientemente, no puede diseñarse y programarse ninguna máquina para construir teorías desde el comienzo, ni en el supuesto siquiera de alimentarlas con un número ilimitado de datos. La construcción de teorías es un proceso tan creador, turbulento e indómito como escribir un poema o una sinfonía (véase Bunge, 1962a). En cambio, hay algunas recetas que ayudan a relativizar y cuantizar las teorías clásicas con tal que éstas no sean demasiado complejas y el relativizador (o el cuantizador) reconozca las diferencias cualitativas entre tales teorías y las ambigüedades que surgen en las transiciones. Hay también algunas reglas heurísticas para *reformular* una teoría física de modo axiomático —pero la aplicación exitosa de tales reglas presupone un conocimiento íntimo de las formulaciones ingenuas o intuitivas y de sus aplicaciones a diversos casos. Por lo tanto tampoco las reglas de la axiomatización pueden ser metidas en una máquina.

Una vez que se ha producido una teoría física y se la ha formulado de modo razonablemente claro, puede ser axiomatizada siguiendo estas instrucciones:

(i) *Revisar las principales formulaciones existentes de la teoría y no aceptar acríticamente lo que pasa por ser la mejor de ellas*: es probable que le falten hipótesis importantes, o que incluya suposiciones que no se usan, o que no respete standards vigentes de rigor matemático y lógico, o que su interpretación física sea insuficiente o incluso incoherente.

(ii) *Recoger todas las fórmulas standards principales empleadas de hecho por los expertos del campo.* Esto es, reunir todos los enunciados más generales de la teoría y sólo aquellos que se usan en la solución de problemas típicos importantes. Prestar más atención a lo que la gente hace con las teorías que a lo que dicen respecto de ellas.

(iii) *Disponer los enunciados previos en orden de generalidad*, partiendo de aquéllos (en caso que los haya) que no especifican ningún modelo particular. Éstos serán candidatos para ser, ya axiomas centrales, ya teoremas principales de la teoría axiomática.

(iv) *Individualizar los principales conceptos en los enunciados precedentes.* Algunos de ellos resultarán ser los primitivos de la teoría.

(v) *Hacer una partición preliminar del conjunto de conceptos principales en primitivos y definidos.* Asegurarse de partir de conceptos que denoten el sistema físico de que se trata: de lo contrario puede que ignoremos de qué hablamos.

(vi) *Reformular los enunciados clave* (3.er paso) en términos sólo de los candidatos a primitivos específicos (5.° paso), usando además tantas ideas lógicas y matemáticas como sea necesario.

(vii) *Examinar el conjunto precedente de enunciados y tratar de derivar los enunciados más específicos de los enunciados más generales.* Si es necesario a este fin, agréguense algunas suposiciones más. Aquellos enunciados que no puedan derivarse así es probable que sean o ajenos a la teoría o componentes de un modelo particular del objeto en cuestión más que ingredientes de la teoría general.

(viii) *Recoger todos los enunciados de prueba*, o premisas, y ponerlos aparte de los probados. Los primeros pertenecerán a la base axiomática de la teoría.

(ix) *Hacer una nueva lista de primitivos* examinando los conceptos principales que figuran en los enunciados reunidos en el paso 8. (Algunos primitivos nuevos pueden haberse deslizado por entre las premisas adicionales introducidas en el paso 7.)

(x) *Establézcanse las condiciones matemáticas y semánticas* que los primitivos deben obedecer para satisfacer los candidatos a axiomas nombrados en el paso 8.

(xi) *Recoger todos los candidatos a postulados* producidos en los pasos 8 y 10.

(xii) *Enumerar todas las teorías presupuestas por los enunciados previos:* éstas constituirán el trasfondo de la teoría dada.

(xiii) *Recopilar los resultados de los pasos* x, xi y xii, esto es, enumerar las presuposiciones, los primitivos, y los axiomas de la teoría. Un —no *el*— *fundamento axiomático* de la teoría estará listo.

(xiv) *Comprobar* si lo anterior incluye o entraña las fórmulas standard de la teoría (paso ii). En caso contrario, considerar si agregar o tachar algunos axiomas.

(xv) *Comprobar* si el sistema de axiomas entraña consecuencias obviamenta falsas. Si lo hace, tratar de encontrar las fuentes (las derivaciones y/o los axiomas) y modificarlas hasta que se supriman los indeseables. Remplazarlas si necesario.

(xvi) *Poner a prueba* la coherencia, la independencia de los primitivos, y la independencia de los axiomas, eventualmente, otras propiedades metamatemáticas.

El último paso —el análisis matemático de un sistema de axiomas— raramente se emprende. Las razones de esta deficiencia son claras. En primer lugar, las contrastaciones metamatemáticas son, a menudo, difíciles de realizar. En segundo lugar, los investigadores en fundamentos por lo usual están ansiosos por abordar otras teorías. En tercer lugar, se confía en el olfato —aun si, a menudo, se husmea erróneamente. Pese a ello, es necesaria una exploración sistemática de las propiedades de los sistemas de axiomas y sería tan recompensante al menos como la investigación análoga de teorías matemáticas, lo que siempre refuerza su rigor y aun su belleza.

Ni qué decir tiene que las precedentes reglas de procedimiento han de ser aplicadas juiciosa e imaginativamente si han de producir cualesquiera resultados valiosos. Ni siquiera la reconstrucción de teorías es un proceso mecánico: hace falta cierta intuición y experiencia para detectar las ideas clave en una teoría y dar con un equilibrio entre el rigor pedantesco y la dejadez total.

4. Propiedades de un buen sistema de axiomas físico

Examinemos las propiedades que un sistema de axiomas puede tener, y descubramos las deseables en la física y por qué.

(i) *Coherencia formal*: el sistema de axiomas debería estar libre de contradicciones. De lo contrario, entrañaría todo posible enunciado y consecuentemente podría ser usado para "probar" cualquier cosa. Que algo se sigue de una falsedad lógica es inmediato: si A es falso entonces $A \Rightarrow B$, con B arbitrario, es lógicamente verdadero y, por consiguiente, inmune a la experiencia. De ahí que, por definición de implicación, A implicará B, sea cual fuere el enunciado que B pueda representar.

Todo el mundo concede que la condición de coherencia formal es el primer requisito de racionalidad, condición, por consiguiente, que debe satisfacer toda teoría. Pese a ello, a menudo se viola esta condición. Así, suele creerse generalmente que una teoría de campo puede adquirir un significado físico mediante el solo recurso a la ficción de un cuerpo de prueba pasivo, el cual facilitaría además una "definición operacional" de la intensidad del campo. No obstante, se reconoce que un cuerpo de prueba que no reacciona sobre el campo viola las ecuaciones de campo y, más aún, es un perfecto extraño en el caso de un campo de radiación libre de materia. También está claro que la función de un cuerpo de prueba no es la de infundir significados sino, en el mejor de los casos, poner a prueba una teoría de campo. Incluso lo último es una ficción, pues cualquier instrumento de medición de un campo real es mucho más complejo que el mítico cuerpo de prueba que se mueve obedientemente a lo largo de una línea de fuerza. Más aún, las intensidades de campo (o los potenciales correspondientes) no se introducen por medio de definiciones sino por medio de axiomas. Algo similar sucede con todas las tentativas restantes de asignar significados físicos según el espíritu del operacionalismo: introducen confusiones entre el referente de una teoría y uno de los modos de contrastarla, y apartan la atención del objeto o referente de la teoría hacia instrumentos más o menos imaginarios (o, por el contrario, excesivamente especializados) presuntamente descritos por la teoría en cuestión —cuando la verdad es que cualquier explicación del

funcionamiento de un dispositivo experimental exige la cooperación de diversas teorías, según se verá en el capítulo 10.

(ii) *Completitud deductiva*: el sistema de axiomas debería contener (como axiomas) o implicar (como teoremas) todos los enunciados legales conocidos en el campo que la teoría se propone cubrir, en particular, las ecuaciones de movimiento y/o las ecuaciones de campo y/o las ecuaciones constitutivas o de estado. La completitud deductiva se ocupa del desideratum de máxima verdad (o grado de verdad): en efecto, los enunciados legales son, en cualquier campo, las mejores conceptualizaciones disponibles de las pautas objetivas de que se ocupa una determinada disciplina. Y, en este contexto, "mejor" significa "más verdadero". Caso de que un sistema de axiomas dejara de cubrir un enunciado legal en el campo dado, habría que enriquecerlo bien con la adición de ese enunciado legal como axioma extra, bien con el fortalecimiento de algunos de los axiomas de suerte que se obtenga ese enunciado legal.

Por obvio que parezca, este requisito de completud deductiva (débil) es arduo de cumplir. Pero al menos debe reconocerse como norte de la axiomatización. No sucede así con los sistemas de axiomas que los matemáticos producen para la mecánica cuántica: a menudo, dejan de incluir la ecuación general de Schrödinger o su equivalente y, consiguientemente, no permiten predecir nada. Un sistema de axiomas que no se ocupa de sistemas físicos —sino de objetos matemáticos, o bien de objetos no físicos concretos como observaciones— y no contenga ningún enunciado legal, se descalifica como teoría *física*.

Nótese que nuestra exigencia de completud deductiva débil concierne sólo a enunciados legales: no estipula que el sistema de axiomas debería suponer o implicar todo enunciado en el campo. Los sistemas de axiomas físicos deberían ser deductivamente completos en un sentido más bien *débil* que fuerte, pues si fueran completos en el último sentido, entonces no podríamos adjuntarles premisas nuevas y permanecerían inaplicables e incontrastables. (En efecto, dado cualquier enunciado s en un cierto campo, s es ya un miembro de una teoría completa T en ese campo, de suerte que s no puede agregarse a T. La otra posibilidad sería agregar a T la negación de s, pero esto introduciría una contradicción: la teoría T' enriquecida con el enunciado no-s sería incoherente. En resumen, una teoría completa en el sentido

fuerte no puede enriquecerse sino haciéndola incoherente. O lo que es igual: sólo las teorías incompletas pueden recibir premisas adicionales sin riesgo de contradicción.)

Queremos, pues, que nuestras teorías científicas sean *in*completas de suerte que quepa enriquecerlas con enunciados no legales tales como hipótesis subsidiarias y datos —v. g., la suposición de distancia interpartícula constante que se agregó en la sección 2 a los axiomas de la teoría clásica de la gravitación a fin de obtener la ley de caída de los cuerpos de Galileo. De lo contrario, esto es, si nuestras teorías se cerraran a premisas externas (pero compatibles), serían inaplicables e incontrastables, pues toda aplicación y contrastación requiere la adjunción de enunciados (v. g., condiciones iniciales, valores especiales de funciones, etc.) que son excesivamente específicos para ser incluidos entre los axiomas. Una teoría completa sería o una torre de marfil o un ejemplo de una teoría, esto es, una aplicación o modelo teórico, y, en cualquier caso, sería incapaz de manejar nuevos casos. En resumen, deberíamos tratar de axiomatizar sólo el corazón de una teoría.

En todo caso, es difícil alcanzar teorías completas, y la incompletud en el sentido fuerte es bienvenida no sólo en física sino, en ocasiones también, en matemáticas, y esto por la misma razón: porque aporta la posibilidad de adjuntar suposiciones distintas a las de los axiomas y obtener así teorías más específicas. Así, una de las razones de la versatilidad de la teoría general de grupos es que puede ser enriquecida con cualquier número de suposiciones, v. g., la conmutatividad (para obtener grupos abelianos) y la condición de que el conjunto básico consista de un número fijo de elementos. (En ocasiones, se dice que las teorías incompletas no son axiomatizables, pero ello es erróneo si resulta que se basan en un conjunto definido de axiomas. Lo que no puede ser completamente axiomatizable es el campo íntegro que tales teorías incompletas se proponen cubrir.)

Ahora bien, para implementar la meta de la completud deductiva en el sentido débil (cobertura exhaustiva de las leyes en un campo), debemos construir sistemas de axiomas fuertes. Esto es, si queremos una teoría rica debemos seleccionar axiomas fuertes. Y si queremos axiomas fuertes debemos usar conceptos básicos (indefinidos) fuertes. Un concepto fuerte es aquel que subsume muchos otros conceptos, tal como un axioma fuerte es el que está grávido de consecuencias lógi-

cas. Deberíamos, por consiguiente, abstenernos de elegir enunciados singulares (proposiciones concernientes a individuos específicos) y, en general, deberíamos tratar de descartar idiosincrasias al construir sistemas de axiomas. Especificar detalles sería tan tonto como legislar el diámetro de las tuberías: semejante especificación debe dejarse a la aplicación. Incluso enunciados generales pero derivables deben descartarse como candidatos a axiomas. Así, no deberíamos postular promedios, ya que las distribuciones nos darán no sólo promedios sino a la vez cualquier número de momentos estadísticos. En resumen, debemos favorecer la *fuerza* lógica, pues cuanto más fuerte es una idea más rico será su contenido. Tratemos de recortar nuestras alas, pero en principio dejemos que las alas crezcan.

(iii) *La completud primitiva*: los axiomas que no son suposiciones físicas deberían establecer las condiciones necesarias y suficientes para cada uno de los conceptos básicos (indefinidos) de la teoría, de suerte que estos conceptos tengan a la vez sentido matemático y físico. Más aún, todo axioma semejante debería tener sentido por sí mismo, de suerte que pudiera remplazársele o incluso negársele cuando buscamos teorías mejoradas o al efectuar pruebas de independencia. Esto requiere un mínimo de complejidad. Así, el enunciado ". es una operación asociativa binaria en el conjunto *S*" no debería escindirse en "*S* es un conjunto" y ". es una operación binaria asociativa", pues sería imposible encontrar un modelo (interpretación verdadera) en el que valiese uno y el otro no.

La especificación de la naturaleza matemática (conjunto, relación, función, etc.) de todo primitivo es una tarea matemática que puede llevarse a cabo con cualquier grado de refinamiento que permita el estado de la matemática. En cambio, la tarea de asignar significado físico a un símbolo rara vez se efectúa de manera totalmente satisfactoria, y ello por razones a la vez técnicas y filosóficas. La dificultad técnica se reduce a esto: mientras que en matemáticas una teoría se interpreta normalmente, si en algún caso, dentro de alguna teoría distinta (v. g., los elementos de un grupo como números), la interpretación de un símbolo físico consiste en la asignación de un objeto *extrateórico*, bien sea ente físico (v. g., un dieléctrico) bien propiedad física (v. g., la constante dieléctrica). Y semejante correlato físico o referente del símbolo en cuestión se conoce en parte a través de las mismas teo-

rías. Consiguientemente, la asignación de significado físico no se hace término a término y de modo completo: cierto, no se debe olvidar el enunciar las suposiciones semánticas, pues trazan, al menos, un perfil semántico de los primitivos, mas no por ello hay que doten a los símbolos de significado preciso y pleno. En resumen, los significados físicos los asignan teorías enteras y, aun entonces, sólo esquemáticamente.

En cuanto al obstáculo filosófico para el logro de esta tarea, reside en la supervivencia de una filosofía tan desconfiada de las teorías que pide la reducción de todo término teórico a un complejo de operaciones de laboratorio, en lugar de permitir la explicación teórica de éstas. Así, algunos físicos, deseando dotar de contenido físico a la relatividad general, y confundiendo significado con contrastabilidad, recargarán el universo todo de reglas y relojes manejados por observadores ubicuos. Al actuar así, pasan por alto que semejante profusión de instrumentos de medición y observadores distorsionaría el campo, y olvidan que el agregado de elementos imaginarios no hará más realista a la teoría. Si una teoría ha de ser física, debe interpretársela en términos físicos: no en términos de operaciones humanas, sino de modo tal que las suposiciones de interpretación asignen a los símbolos (básicos) referentes supuestamente objetivos, y de modo tal que estas suposiciones (que pueden resultar falsas) no contradigan las suposiciones restantes del sistema de axiomas.

(iv) *Independencia primitiva*: los conceptos básicos de un sistema de axiomas deberían ser mutuamente independientes, esto es, no deberían ser interdefinibles. (Si cualquiera de ellos fuese, de hecho, definible en términos de otros conceptos básicos, entonces no sería un concepto primitivo.) La importancia de esta propiedad reside no tanto en la economía cuanto en el hecho de centrar nuestra atención en las unidades lógicamente básicas e impedir movimientos circulares tales como el intento de definir la masa como razón de aceleraciones (sobre la base de la ley de Newton) y luego la fuerza como el producto de la masa por la aceleración.

(v) *Independencia de postulados*: idealmente, los diferentes axiomas de una teoría no deberían ser interdeducibles. (Si uno de ellos fuese derivable de algunos otros axiomas de la teoría, entonces sería un teorema de la misma.) Esta condición es importante no tanto por su

pretendida propiedad de economía —que es, en todo caso, ilusoria— sino por cuanto facilita la alteración de la teoría a la luz de desarrollos experimentales o teóricos. Pues si cabe señalar y suprimir los axiomas responsables de consecuencias falsas entonces los otros pueden conservarse. En resumen, la independencia facilita el progreso teórico.

5. Indeseables

Hasta aquí hemos señalado cinco características deseables de un sistema de axiomas físico. Mencionemos unas cuantas indeseables. Una característica tal —a saber, la *completud* en el sentido fuerte— se mencionó anteriormente. Una propiedad relacionada es la de la *categoricidad*, o, más bien, rigidez o inflexibilidad. Una teoría categórica es aquella respecto de la cual dos modelos (interpretaciones verdaderas) de su formalismo abstracto subyacente son isomorfos (estructuralmente idénticos). Ahora bien, una condición necesaria para el isomorfismo de teorías es que los conjuntos correspondientes sean similares, esto es, haya correspondencia biunívoca entre ellos. Pero no queremos tal rigidez para la física pues, aun poseyendo dos teorías de fórmulas básicas formalmente idénticas (v. g., ecuaciones de onda), pueden referirse a tipos enteramente diferentes de sistemas físicos, tipos que se conceptualizan como conjuntos que no precisan ser similares.

¿Qué decir de la *simplicidad*, en particular la simplicidad formal o la economía de forma? Suele alegarse que toda teoría debería poseer simplicidad formal máxima, en el sentido de que debería tener el mínimo número posible de primitivos y axiomas. Pero este requisito es paralizante, salvo que se agregue la condición de que la minimización de ideas básicas (primitivos y axiomas) debe ser compatible con los desiderata a la par de la completud deductiva débil y la completud primitiva. Pues, de lo contrario, la simplificación podría llegar incluso a producir una teoría falsa. En todo caso, los desiderata deberían justificarse, y ninguna justificación razonable se da nunca de la simplicidad formal, salvo la de ser conveniente.

Hay, con todo, una razón, a saber, que la simplicidad decrece las oportunidades de error y, en particular, de incoherencia oculta. Así, si

podemos deducir las leyes básicas de un campo a partir de un único principio variacional (acompañado de su escenario matemático y semántico), el problema de la coherencia no se presentaría. (O, más bien, el peso de las pruebas de coherencia se cargaría sobre los hombros del matemático.) Pero en tal caso, la simplicidad es un medio, no un fin en sí. En cuanto a los otros tipos de simplicidad —semántica, epistemológica, metodológica y pragmática (Bunge, 1963)— pueden ocasionalmente ser de valor siempre que no entren en conflicto con desiderata superiores, principalmente la coherencia y la completud deductiva débil, que implican verdad máxima. Después de todo, la meta de la investigación científica no es gratificar prejuicios filosóficos tales como el simplicismo y el odio a la teorías, sino descubrir cómo son realmente las cosas, aun si persisten en su mal hábito de ser usualmente más complejas de lo originariamente presumido.

En cualquier caso, el número de conceptos primitivos de una teoría no puede disminuirse a voluntad, so pena de empobrecer la teoría hasta el punto de la inutilidad. La base primitiva mínima de una teoría física cualitativa está constituida por dos conceptos: una clase de referencia (el conjunto de entes físicos a que se refiere la teoría) y otro ítem, que podría ser una relación o una operación sobre ese conjunto, v. g., la adición física o yuxtaposición de dos elementos arbitrarios de ese conjunto. De lo contrario, la teoría no contendría un enunciado legal, v. g., la conmutatividad de la adición física. Una teoría cuantitativa requiere al menos tres primitivos: la clase de referencia y otros dos items, que podrían ser un conjunto adicional y una función numérica sobre el producto cartesiano de esos dos conjuntos. Así, una de las fórmulas cuantitativas más simples que cabe pensar es de la forma: $dP/dt=0$, donde P representa una propiedad y es una función real definida sobre $\Sigma \times T$, siendo Σ el conjunto de referentes y T el conjunto de instantes.

Ahora bien, una teoría con dos primitivos necesita al menos cinco axiomas: una suposición física que relacione los dos primitivos, y dos suposiciones no físicas (matemáticas o semánticas) por cada primitivo: un axioma matemático y uno semántico. En general, N primitivos piden un mínimo de $2N+1$ axiomas. Este es un puro mínimo: normalmente es imposible comprimir todas las propiedades matemáticas de un concepto en un solo enunciado —a menos de recurrir a la treta de

conjugar diversos axiomas. (En la sección 1 se recurrió a ella: el axioma (3a) es, en realidad, la conjunción de tres axiomas.) No hay que sorprenderse, pues, de que incluso una teoría elemental como la mecánica newtoniana de partículas, que tiene ocho conceptos específicos básicos independientes, contenga más de dos docenas de axiomas cuando se la explicita (Bunge, 1967a).

6. Ventajas de la axiomática

Hay, al menos, diez buenas razones para valorar el enfoque axiomático de la teoría física:

(i) *Las presuposiciones se reconocen y mantienen bajo control.* En el tipo de axiomática abogado en este trabajo, el trasfondo de una teoría —tanto sus presuposiciones formales como las no formales— se exhibe en primer lugar, de suerte que pueden tenerse presente para su eventual crítica y corrección. Ejemplo: en ocasiones se alega que la mecánica cuántica presupone la mecánica clásica. Pero, se sabe que estas dos teorías son mutuamente inconsistentes. El error podría haberse evitado axiomatizando la mecánica cuántica: cuando así se hace no emerge tal dependencia respecto de la mecánica clásica.

(ii) *El referente de la teoría no se pierde de vista.* Salvo que se lo formule en detalle, un enunciado científico puede dar la impresión de no referirse a ninguna entidad real, o, por el contrario, dar lugar por sí mismo a interpretaciones arbitrarias. Pero si los axiomas enuncian explícitamente cuáles son *todos* los argumentos (o los índices) de las funciones que figuran en los enunciados, es probable que no se cometan tales errores. Ejemplo: se sostiene a menudo que la mecánica cuántica no se refiere a sistemas físicos existentes autónomamente sino a mediciones, o a bloques inanalizables objeto-aparato-sujeto, o a nuestro conocimiento, o incluso a proposiciones. Así, se enunciará dogmáticamente que todo hamiltoniano pensable representa una medición de energía —incluso en casos en los que es obvio que el hamiltoniano se refiere a un sistema libre e incluso si nunca proporciona información alguna en cuanto a cómo realizar tal medida. En una formulación axiomática no se permiten tales enunciados sin fundamento: uno sabe de qué está hablando.

(iii) *Los significados se asignan sistemáticamente, consistente-*

mente, y de modo literal, más que errática, inconsistente y metafóricamente. Un contexto abierto tolera las asignaciones arbitrarias y analógicas de significado y, por consiguiente, ampara la ambigüedad e invita a la inconsistencia. Tales riesgos se minimizan en un contexto axiomático con tal que se provean los axiomas semánticos. Ejemplo: en los libros de texto usuales de mecánica cuántica "ΔX" recibe una diversidad de interpretaciones mutuamente incompatibles: desviación standard, incertidumbre subjetiva, error de medición, diámetro de un paquete de ondas, etc. Es más, pocas de estas interpretaciones son compatibles con la interpretación asignada a los símbolos restantes de la teoría; por ejemplo, no puede haber cuestión de la incertidumbre subjetiva a menos que se introduzca explícitamente un sujeto. Una formulación axiomática de la mecánica cuántica, en cambio, se comprometerá con una sola interpretación definida de "ΔX" y, lo que es más, ésta será una interpretación compatible con la asignada a "X" y a los otros símbolos, más bien que con una interpretación adventicia. (Véase el capítulo 5.)

(iv) *Pueden descubrirse otros teoremas*. Si las suposiciones iniciales de la teoría se exponen explícitamente y se formulan en el mejor lenguaje matemático disponible, el número de teoremas crecerá necesariamente, esto es, la parte conocida de la teoría se ve obligada a crecer. Ejemplo: al perfilar y axiomatizar varios capítulos de la física clásica, se han derivado recientemente varios teoremas nuevos. (Véase, v. g., Truesdell, 1966, 1969.)

(v) *Las pruebas inválidas se reducen a un mínimo*. En un contexto abierto, para probar un teorema se siente tentado uno e incluso autorizado a recurrir a cualesquiera premisas que pueden ser de ayuda. Esta fertilización o fecundación cruzada conduce, en ocasiones, a valiosas ideas nuevas y, en otras, a absurdos. Hay que vigilarla cuidadosamente en física, que es un conjunto de teorías que no son todas mutuamente compatibles. El menosprecio de las fronteras resulta peligroso, sea en física o en matemática, cuando se llega a probar metaenunciados, en particular, enunciados concernientes a una teoría entera, pues en este caso la teoría en cuestión debe ser claramente "definida", esto es, debe formulársela axiomáticamente.

Ejemplo: todos los razonamientos que impliquen procesos "virtuales" en la física atómica, nuclear y de partículas son inválidos por-

que supuestamente se justifican por la llamada cuarta relación de indeterminación, $\Delta E \cdot \Delta t \geqslant \hbar/2$, que en la mecánica cuántica carece de significado, ya que el tiempo es una variable carente de dispersión (recuérdese el capítulo 2, sección 2). Consecuentemente, la teoría mesónica de las fuerzas nucleares es incorrecta en cuanto asume que el mecanismo de las interacciones fuertes es el intercambio de piones, entendido como la transformación reversible de un protón en un neutrón y un pión positivo. Estos procesos son imposibles porqué violarían la conservación de la energía: en efecto, las masas de los nucleones son casi iguales y la masa del pión es vecina a 140 MeV. No obstante, estos intercambios y el pión de transferencia se consideran como la misma fuente de la estabilidad nuclear. Se llaman *virtuales* (más bien que *ficticios*) y se justifican por recurso a la 4.ª desigualdad de indeterminación, que es en sí misma injustificada. La justificación es ésta: al poner $\Delta E = 140$ MeV (lo que es extraño porque en este caso no hay ninguna dispersión en torno a un promedio) se obtiene $\Delta t > 10^{-24}$ segundos. Y éste es un período demasiado breve para que la violación sea observable, real, por lo tanto, en sentido operacional. La construcción toda se hunde al constatar que descansa en la cuarta relación de indeterminación, fórmula ajena a la teoría.

(vi) *Se evitan las pruebas irrelevantes*. En un contexto abierto puede sentirse uno tentado a buscar pruebas que sean innecesarias o que incluso carezcan de sentido en el contexto dado. Ejemplo: la aserción de que no hay variables ocultas es, hablando estrictamente, carente de sentido. Lo que es significativo es el enunciado relativizado de que no hay variables ocultas en la mecánica cuántica *standard*, pues este enunciado puede comprobarse examinando las variables dinámicas básicas de la teoría —examen que requiere la axiomatización de ésta. Parte de la controversia sobre las variables ocultas podría haberse evitado si hubiese habido genuinas axomatizaciones disponibles de la mecánica cuántica. Y toda la discusión actual (véase Bastin, 1971) sobre la posibilidad de ir más allá de la mecánica cuántica —sea en la misma dirección, sea, reforzando los ingredientes estocásticos, o bien, finalmente, debilitándolos— se aprovecharía de semejante formulación explícita y coherente, pues se llegaría a saber exactamente qué ha de superarse y qué tipos de variables nuevas deberían de introducirse.

(vii) *Se evita el racionalismo utópico.* El racionalista ingenuo desea definir todo concepto y probar todo enunciado: no advierte que esto le llevará o a girar en círculo o a un regreso infinito. La racionalidad genuina pide la aceptación, al menos *pro tempore*, de un conjunto de conceptos indefinidos y enunciados no probados, pues nos capacitará para derivar y justificar así todo lo demás. Seguramente, esa aceptación no es cuestión de fe: debe justificarse. La justificación para introducir un concepto primitivo reside en que cumple un cometido en una teoría: y la justificación para proponer un axioma consiste en que (usualmente en cooperación con otras premisas) implica teoremas que explican o predicen algo. Ejemplo: el hábito de partir de una exposición con una lista de definiciones traiciona al racionalismo utópico y así sucede con muchos de los intentos de deducir la mecánica cuántica sea de la física clásica o de teorías puramente matemáticas.

(viii) *Se consiguen aclaraciones heurísticas.* Una teoría axiomática, que exhiba todas sus suposiciones, tienta al científico audaz a suspender alguna de ellas, remplácela o no, sólo para ver qué "suce-de", esto es, cómo se ve afectado el conjunto de consecuencias. Si se borra algún postulado, se perderán algunos teoremas; si se remplazan por una suposición diferente, algunos teoremas cambiarán. En cualquier caso, se producirá una nueva teoría. Ejemplo: las geometrías no-euclídeas se construyeron de esta manera.

(ix) *Se facilita el análisis.* Usualmente, el análisis de las ideas físicas no procede dentro de ningún contexto fijo. Habitualmente ni siquiera las discusiones sobre la definibilidad se conducen en un contexto axiomático. De este modo, nada puede establecerse, pues es perfectamente posible que un concepto sea indefinido en un sistema y definido en otro. Asimismo, una hipótesis puede suponerse en una teoría y derivarse en otra. El análisis en contexto abierto es necesariamente inexacto e incompleto: descuida ideas básicas e introduce nociones irrelevantes, y, en todo caso, no puede exhibir la exacta forma y significado de un símbolo, pues hacer esto es precisamente producir un sistema de axiomas, por reducido que sea. Ejemplo: todo el sinsentido en la definición del concepto de tiempo en términos de procesos irreversibles podría haberse evitado bien con la construcción de una teoría axiomática del tiempo bien axiomatizando al menos una teoría de procesos irreversibles. La primera jugada habría mostrado que un

concepto universal de tiempo, aplicable a cualquier capítulo de la física, no debe vincularse con ningún proceso especial. Y la segunda habría mostrado que algún concepto de tiempo debe estar disponible antes de que las mismas ecuaciones para un proceso irreversible puedan escribirse. (Véase Bunge, 1970e.)

(x) *Se disuade la reforma de fórmulas fuera de contexto.* Supongamos, o, más bien, recordemos, que alguien alegara que la relatividad especial sostiene la hipótesis de que hay partículas superluminosas (taquiones) sobre la base de que esta conjetura no viola la definición de impulso en la mecánica relativista. Una réplica obvia, desde el punto de vista de la axiomática, sería ésta. Taquiones y otras cosas extrañas pueden muy bien existir en la realidad pero, en tal caso, obedecen a alguna teoría distinta de la mecánica relativista, la cual implica las fórmulas de Lorentz a las que los taquiones desobedecen (Mariwalla, 1969), y no da cabida a trayectorias imaginarias. (Si $v > c$ entonces no hay trayectorias reales para fuerzas reales a menos que se asigne al taquión imaginario una masa imaginaria, lo que carece físicamente de significado.) Algo similar sucede con la conjetura de que hay partículas con carga eléctrica imaginaria: es verdad que podrían interactuar merced a una fuerza real de Coulomb, pero en la teoría electromagnética standard no podrían interactuar con partículas normalmente cargadas y serían incapaces de emitir ondas electromagnéticas. Para generalizar: mientras que cualquier fórmula dada puede modificarse cuando se la toma aisladamente *ad libitum*, una teoría entera no puede deformarse tan cómodamente, por ser un sistema cuyos componentes se sostienen todos entre sí. Es por esto por lo que estamos justificados en asignar a teorías enteras o sistemas hipotético-deductivos, una credibilidad más fuerte que a conjeturas desperdigadas.

(xi) *Se evita la acrobacia numerológica.* Puede jugarse un juego puramente formal con las constantes físicas y otros números para producir conjuntos de números que parezcan físicamente significativos. Tales deportes pitagóricos fueron populares por los años treinta y estamos condenados a continuar jugándolos, a menos que nos acostumbremos a pensar en términos de teorías globales. En efecto, el requisito de la axiomatización exhibe la falta de significación de tales deportes mostrando (*a*) que no implican enunciados legales y (*b*) no

indican claramente los referentes de los símbolos implicados. (Para la trivialidad de la numerología, véase el capítulo 3.)

(xii) *Se hacen posibles las pruebas metamatemáticas*. Salvo que se la axiomatice, no cabe estar seguro de si una teoría posee algunas de las propiedades metamatemáticas (v. g., coherencia) que alega para sí. (La axiomatización es necesaria pero no suficiente. Incluso en matemáticas se obtienen a lo sumo, en la mayoría de los casos, pruebas de coherencia *relativa*: así puede mostrarse que la geometría euclídea es consistente con tal que se suponga la consistencia del sistema de números reales.) Ejemplo: las pruebas existentes de la equivalencia (isomorfismo) de la mecánica matricial y la mecánica ondulatoria son heurísticas antes que rigurosas, y ello por dos razones. Primera, la misma definición de isomorfismo ha de ser construida *ad hoc* para todo tipo de teoría: así la definición de base primitiva consistente en un conjunto y una relación difiere de la adecuada a una base consistente de dos conjuntos. Segunda, en la época en que se formularon dichas pruebas (heurísticas) del isomorfismo de ambas "imágenes" (formulaciones) no se disponía de axiomatizaciones de ninguna de ambas. Consecuentemente, es posible dudar —como hace Dirac— de si las dos formulaciones son efectivamente equivalentes. Algo similar vale para la formulación de la integral de camino de Feynman en relación con las formulaciones standards.

(xiii) *Se facilita grandemente la memorización*. Los psicólogos experimentales han mostrado que un cuerpo bien organizado de conocimiento es mucho más fácil de memorizar que un conjunto de items sin vínculos aparentes. En efecto, el reciente trabajo experimental ha mostrado que "nuestras memorias están limitadas por la cuantía de las unidades o símbolos que deben dominar, no por la cuantía de información que estos símbolos representan. Es útil organizar inteligentemente el material antes de intentar memorizarlo. El proceso de organización nos capacita para reunir la misma cuantía total de información en muchos menos símbolos, y ello facilita el recuerdo" (Miller, 1967, p. 12). Dado que en cualquier caso, nuestra capacidad de almacenaje es más bien pobre, ganaríamos psicológicamente con conservar en mente sólo los axiomas centrales y unos cuantos teoremas típicos de una teoría más que una mezcla abigarrada de enunciados. Las potencialidades pedagógicas del enfoque axiomático se examina-

rán más adelante en la sección 8.

Volvamos ahora a las quejas usuales sobre la axiomática.

7. Objeciones standard a la axiomática

Las principales objeciones standard al enfoque axiomático parecen ser las siguientes:

Objeción 1: La axiomática no retrata el proceso actual de la construcción de una teoría. Por consiguiente, no nos enseña cómo construir teorías. *Réplica*: cierto pero irrelevante. La mostración de los procesos de investigación fácticos es ocupación de metodólogos, psicólogos, historiadores de la ciencia y biógrafos. (Recuérdese el capítulo 7, sección 1.) No se puede alcanzar a la vez la sistematicidad y la historicidad, pues son dos polos aparte: o se trabaja en una formulación razonablemente nítida de una teoría, o se ofrece una buena descripción de la historia de su concepción —un proceso zigzagueante pleno de motivaciones más o menos oscuras, como de irrelevancias, inconsistencias, y falsas jugadas. No es un defecto del método axiomático sino más bien una virtud suya la de dar lugar a productos terminados de propiedad pública, cuyo uso no requiere ningún careo previo con las biografías de los científicos implicados en la motivación, construcción, aplicación y contrastación de la teoría.

Objeción 2: La axiomatización es un trabajo de recomposición más que original. Es tarea para autores de libros de texto, no para investigadores originales. *Réplica*: los matemáticos no comparten esta creencia. Consideran la axiomatización de la geometría de Euclides, la axiomatización de la aritmética de Dedekind-Peano, la axiomatización de las probabilidades de Kolmogoroff, y los numerosos sistemas de axiomas de Bourbaki, como obras originales. Creen que estas axiomatizaciones (*a*) descubrieron las ideas esenciales y las relaciones lógicas de una teoría, (*b*) esclarecieron y purificaron las ideas implicadas, y así (*c*) facilitaron desarrollos posteriores. Así, con anterioridad al trabajo de Kolmogoroff sobre la probabilidad y sus fundamentos teóricos, la gente tendía a centrarse en sucesiones bernouillianas y en los enunciados que las concernían, tales como la ley de los grandes números y el principio (no teorema) según el cual de tales secuencias

(muy particulares) no cabría esperar desviaciones sistemáticas de la probabilidad. Aun cuando sean teoremas importantes, no son lógicamente fundamentales y, comoquiera que conciernen a un caso particular (secuencias de Bernouilli), si se centra la atención en ellos (como hizo von Mises) se obtiene una idea errónea de la generalidad de la teoría de la probabilidad y de su estructura lógica. Si los matemáticos valoran la axiomática ¿por qué los físicos habrían de despreciarla? (Por la misma razón ¿qué hay de malo en escribir libros de texto? ¿Por qué habría de evaluarse un buen libro de texto menos que un mal artículo?)

Objeción 3: La axiomática es estéril. Se han descubierto nuevas leyes por procedimientos heurísticos, no por la reconstrucción axiomática de lo ya sabido. Y los nuevos problemas se resuelven aplicando y ampliando las teorías existentes mejor que rebarajándolas. *Réplicas*: Muy cierto, pero no del todo. En efecto, (*a*) la misma axiomatización es una novedad y exhibe rasgos previamente desconocidos u ocultos, y (*b*) la axiomatización posee algún poder heurístico, puesto que facilita la expansión y crítica de las teorías disponibles a la par que su remplazo por teorías mejoradas. (Recuérdese la sección 6.) Es más, la objeción es irrelevante, pues la meta principal de la axiomática no es encontrar nuevas leyes sino alojarlas adecuadamente. Tampoco es resolver problemas nuevos dentro de una teoría sino más bien responder cuestiones *acerca* de una teoría. En efecto, un objetivo secundario de la axiomática es contribuir a nuestro conocimiento de las teorías, pues sólo después de la axiomatización es cuando su estructura y contenido pueden claramente discernirse y compararse con teorías rivales y, de este modo, evaluarse. (Véase el capítulo 9.) Aun si la axiomatización de una teoría no la hace más potente, —esto es, no le da mayor cobertura y profundidad— la hará más exacta y transparente, de suerte que sus méritos y defectos puedan apreciarse mejor, y, consiguientemente, los debates sobre la teoría puedan ser fructíferos antes que irritantes. También, la filosofía vinculada con la teoría puede revelarse mejor, merced a la axiomatización.

Objeción 4: La axiomatización es un corsé: impide el desarrollo ulterior de la teoría. *Réplica*: Todo lo contrario, el despliegue explícito de suposiciones hace más fácil obtener consecuencias adicionales a la vez que permite criticar y evaluar una teoría. En la medida que una

teoría se guarece en la vaguedad y la confusión, ello puede dar lugar por sí mismo a la apologización y a la controversia interminables y estériles. Si una teoría no es válida, entonces su axiomatización lo mostrará de modo inequívoco; si contiene gérmenes valiosos, éstos pueden crecer y quedar mejor protegidos de los compañeros perniciosos, al desplegar explícita y ordenadamente todos los componentes, los buenos y los malos.

Objeción 5: La axiomática es autoritaria: al llamar a una mera hipótesis *axioma*, nos sentimos aterrados: nuestros poderes críticos se derriten y nos vemos obligados a creer lo que habría que dudar. *Réplica*: Esta actitud retrata un mágico temor por las palabras y una ignorancia de la etimología y significado actual de la palabra "axioma". La palabra griega ἀξιώμα, tal como la latina *postulatus*, significan "solicitud". Y eso significan para nosotros "axioma" y "postulado", tras habernos liberado del credo filosófico según el cual los axiomas deberían ser evidentes y estar más allá de la crítica. Al escribir una fórmula y llamarla "axioma" todo lo que hacemos es *pedir*, a todo el que se interese, que la examine y no que la crea: que la considere, no que la acepte. No intentamos intimidar a nadie para que admita acríticamete las hipótesis iniciales que hemos dignificado con el título de axioma. Al escribir nuestras suposiciones iniciales de manera explícita preparamos la base para una posible discusión fructífera —con nosotros en primer lugar, ya que lo primero que hemos de hacer con un sistema de axiomas es descubrir y examinar lo que entraña. Sólo si nos rehusamos a exhibir todas nuestras suposiciones (hipótesis) podemos tener la esperanza de pasar billetes falsos. La axiomática invita al escrutinio, la crítica, el diálogo.

Objeción 6: La axiomática es en todo caso limitada, ¿por qué, pues, incomodarse? En efecto, toda teoría potente es, en primer lugar, incompleta. (Recuérdese el capítulo 7.) En segundo lugar, la axiomática no nos dice cómo verificar una teoría. *Réplica*: Ambas objeciones son correctas. Pese a todo, están fuera de lugar: las limitaciones de un instrumento no lo hacen inútil. En cuanto a la incompletud inherente, en el sentido matemático, de toda teoría rica: (*a*) los matemáticos enfrentan la misma limitación, lo que no les inhibe de usar el formato axiomático; (*b*) podemos muy bien decidirnos por un sentido más débil de "completud": podemos decir que una teoría física es deductiva-

mente completa en un sentido débil si contiene todos los teoremas standard en el campo. (Recuérdese la sección 4, punto 2.) Y en lo que concierne a la incapacidad de un sistema de axiomas para instruirnos en cuanto a usarlo y contrastarlo, ello es una ventaja antes que un defecto: es un signo de generalidad. Si una teoría, sea axiomática o formal, no especifica las circunstancias en las que puede aplicarse o ponerse a prueba, entonces puede enriquecerse con premisas tentativas adicionales concernientes a especies particulares de cosas y circunstancias especiales. En este sentido, la electrodinámica clásica es completa con tal que su dominio se restrinja a macrosucesos; en cambio, la termodinámica clásica es radicalmente incompleta porque no se aplica a los siempre presentes procesos de no equilibrio. En todo caso, si bien la axiomática es imperfecta (en el sentido de la omniinclusividad), constituye la mejor organización posible que de una teoría pueda darse. Siendo así ¿por qué luchar contra ella?

Objeción 7: Los conceptos básicos de un sistema de axiomas, al quedar indefinidos, continúan sin analizar y, por consiguiente, oscuros. *Réplica*: Cierto en tiempo de Aristóteles, falso hoy. La objeción descansa en una teoría superada de la definición. Hemos aprendido que la definición es sólo un tipo de análisis y elucidación —y uno que no puede llevarse a cabo siempre so pena de circularidad. Otro tipo de análisis más exhaustivo, es el llevado a cabo por los axiomas que caracterizan la forma y contenido de las ideas indefinidas.

Objeción 8: La axiomatización, por ser un procedimiento puramente formal, es incapaz de capturar el significado factual de una teoría. *Réplica*: cierto de la axiomática *formal*, casi falso de la axiomática *física*. (Recuérdese el capítulo 7, secciones 8 y 10.) Mientras que la primera ignora por completo el contenido físico, la axiomática física sistematiza la interpretación propuesta del formalismo, agregando así una precisión semántica ausente en la axiomática formal tanto como en las presentaciones informales o heurísticas. En la teorización informal, los significados se indican vagamente por el contexto: se habla, por consiguiente, del significado *intencional* de los símbolos implicados. Más aún, en contextos abiertos no hay garantía de coherencia formal o semántica. Sólo la axiomática física establece un firme compromiso semántico al nivel de axiomas y lo transporta hasta los teoremas. Aun así, sólo puede trazar un perfil de una teoría: a diferencia de

la forma, el contenido permanece siempre un tanto desdibujado.

En conclusión, las principales objeciones standard a la axiomática parecen derivar de un insuficiente contacto con ella.

8. El lugar de la axiomática en la enseñanza

La axiomática no se dirige al novicio: antes de poner orden en un tema, éste debería captarse de modo informal o heurístico. Una exposición prematura a la axiomática puede resultar en incomprensión o aburrimiento. Testigo, la enseñanza de la geometría euclídea durante siglos antes del descubrimiento de que los niños no son adultos a pequeña escala. El propio Hilbert, campeón de la axiomática en todos los campos, fue consciente de las limitaciones pedagógicas y psicológicas del enfoque axiomático y aconsejó un juicioso compromiso entre ella y el enfoque heurístico o genético —en la enseñanza, claro es. Hizo más, siendo coautor de un libro de texto de geometría intuitiva.

¿Cuándo debería ocurrir una primera exposición a la axiomática? Tan pronto como sea posible, si han de evitarse montones de errores, oscuridades y confusiones y si se prefiere una captación de los fundamentos a la memorización transitoria de masas de fragmentos no relacionados. Pero ¿cuándo es posible hacer eso? Como es claro, la amplitud del umbral axiomático depende del tema. El álgebra moderna puede enseñarse y presumiblemente debe enseñarse según el modo axiomático desde el comienzo, incluso a nivel superior (Suppes —1966). Pero la física es mucho más compleja que el álgebra, incluso más aún que el cálculo, que no puede enseñarse a estudiantes que carezcan de un mínimo de sofisticación matemática y una capacidad y gusto por el pensamiento abstracto. Parece obvio que la física elemental debería continuar siendo enseñada según el modo heurístico, aunque sólo fuese porque la comprensión de un sistema de axiomas físico requiere dominar ciertas ideas matemáticas y lógicas que se adquieren posteriormente. Pero los *profesores* deberían ser conscientes de la axiomática física, de suerte que se abstuvieran de repetir errores científicos (como igualar masa y cuerpo, o energía y radiación), errores lógicos (como tratar de definir cualquier cosa, o probar suposiciones mostrando que algunas de sus consecuencias son verdaderas en rela-

ción con los hechos), o errores filosóficos (como confundir concepto y proposición, o ley y regla, o como alegar que todas las teorías pueden inferirse de datos experimentales).

El enfoque axiomático debería ensayarse a nivel de graduados. Pero incluso aquí podría ser erróneo descartar totalmente el planteamiento heurístico. Quien esto escribe ha tratado con éxito el siguiente compromiso entre la heurística y la axiomática: *tres cuartos de heurística y un cuarto de axiomática.* Los primeros tres cuartos del tiempo pueden dedicarse, como es usual, a una presentación informal (pero no necesariamente errónea y confusa) de las suposiciones principales y los principales teoremas, con un riego abundante de ejercicios y problemas. Al final de este período, el estudiante inquisitivo habrá encontrado tanto material y de manera tan desordenada y lagunar, que buscará una presentación coherente y concisa de los fundamentos de la teoría. Habiendo adquirido un buen stock de fórmulas más o menos aisladas, estará dispuesto a una presentación axiomática de la totalidad, que puede tardar tan poco como un par de semanas. Esta exposición a la axiomática ofrecerá al estudiante una oportunidad para recapitular el material, organizarlo mejor, profundizar en él, y analizarlo críticamente. Pues una presentación axiomática sin la compañía de un análisis crítico es ejercicio más en dogmática. Y esto —el análisis crítico de un sistema de axiomas— constituye, desde luego, la oportunidad de agregar una pizca de metodología, otra de filosofía, y una cubierta de historia. Puesto que todo esto se hace de cualquier modo, mejor hacerlo explícitamente y a la deslumbrante luz de un sistema de axiomas que subrepticiamente y en el claroscuro de la heurística.

En resumen, las teorías físicas deberían enseñarse axiomáticamente una vez captados sus aspectos fundamentales.

9. Observaciones finales

Axiomatizar es sólo maximizar la explicitación y la articulación. Quienes no valoran éstas no necesitan molestarse por la axiomática, pero quienes sí se cuidan no se conformarán con menos, o, en todo

caso, tolerarán a quienes intentan organizar los productos más bien desaliñados de la investigación original.

En ciencia, sólo la creación de potentes teorías nuevas debería evaluarse más alto que la axiomática. Con todo, una axiomatización adecuada de una buena teoría controvertida es ciertamente no menos valiosa que la construcción de una teoría mala e ignorada. La axiomatización no reemplaza la creación de teorías ni compite con éstas sino que, por el contrario, consuma el proceso creador. Como cualquier otro refinamiento, la axiomatización es conveniente, y aun óptima, bien que no indispensable para los propósitos cotidianos.

No obstante, así como hay ocasiones que requieren bizcochos y no pan, así en ciencia hay ciertas encrucijadas en las que vale más ordenar que amontonar. Si el problema es esclarecer cuestiones teóricas y metodológicas, analizar y evaluar teorías, y estimar programas rivales de construcción teórica más que elaborar y aplicar teorías existentes, entonces la axiomática deja de ser un refinamiento para convertirse en una primera necesidad. En efecto, sólo teorías clara y plenamente formuladas pueden ser sometidas a juicio imparcial.

La axiomática, además, puede ayudar a la maduración de la ciencia física más que a su mero desarrollo en volumen. En efecto, la axiomática refuerza el rigor y la claridad –la exposición, por tanto, al análisis y la crítica– que, junto con la profundidad y la audacia, constituyen la madurez en cuanto distinta del mero tamaño (Bunge, 1968a). Finalmente, la axiomática puede ayudarnos a hacer frente a la explosión o, por mejor decir, diluvio de información. Pues si no podemos estar al día con los detalles, al menos podemos seguir el desarrollo de la investigación fundamental en un determinado campo: los problemas fundacionales son siempre actuales y rara vez cabe esperar soluciones finales para ellos.

Capítulo 9

LA RED DE TEORÍAS*

Toda teoría física puede articularse nítidamente, esto es, axiomatizarse. ¿Sucederá lo mismo con la totalidad de las teorías físicas? ¿Sería posible organizarlas en un gigantesco sistema único con una teoría fundamental o comprehensiva en la base, cuyas consecuencias lógicas serían las diversas teorías regionales? En varias ocasiones se ha soñado con semejante organización. Hace un siglo, la mecánica se consideró como el fundamento del edificio todo de la física; más tarde, la esperanza viró hacia la electrodinámica; más recientemente, hacia la relatividad general o la mecánica cuántica. Pero, hasta ahora, no se ha encontrado ninguna teoría física enteramente unificada (o, más bien, unificante) que dé cuenta de la totalidad de la realidad física y contenga a cada una de las teorías particulares. Lo que se ha encontrado es (*a*) que el número de teorías sigue creciendo, (*b*) que algunas teorías, consideradas inicialmente autónomas, resultaron ser subteorías de otras, y (*c*) que clases enteras de teorías pueden formalmente subsumirse bajo formalismos amplios, tales como el lagrangiano que, ay, apenas posee contenido físico. Obviamente, ninguno de estos éxitos parciales cumple el requisito de la total unificación matemática y física. Así, continuamos siendo pluralistas prácticos aun si algunos de nosotros sueñan con una única superteoría. Y, harto comprensiblemente, la mayoría ansiamos más desarrollar teorías que den cuenta de territorios desconocidos, como la física de alta energía, que unificar las teorías existentes, obviamente insuficientes.

* Algunos parágrafos se reproducen de Bunge (1970c) con permiso del compilador y editor.

El que las teorías físicas existentes no pueden juntarse bajo una sola teoría comprehensiva sin cambiar considerablemente en el proceso, es cosa que debiera ser obvio: nuestras teorías actuales no son enteramente coherentes entre sí. Y no podemos darnos el lujo de prescindir de ninguna de las grandes teorías aun sabiendo que tienen defectos incurables. Por ejemplo, necesitamos la mecánica clásica, que es parcialmente inconsistente a la par con la electrodinámica y la mecánica cuántica, aunque sólo sea para diseñar contrastaciones experimentales de estas teorías. Una teoría unificante no puede, por consiguiente, ser una mera fusión de las teorías disponibles: debe ser radicalmente nueva. Que tal sueño llegue a realizarse, es imposible de prever. En todo caso, es un problema para los físicos, no para los investigadores en los fundamentos y la filosofía de la ciencia, puesto que consiste en construir una superteoría física (no sólo matemática) más que en reorganizar o analizar cualesquiera teorías existentes.

Sea o no posible una teoría superunificante, deberíamos cartografiar el mundo de las teorías físicas existentes: deberíamos poder exhibir sus relaciones mutuas, tal como los matemáticos pueden hacer con la mayoría de sus teorías. Lamentablemente, también éste es un problema abierto: aunque cualquiera puede dibujar lindos diagramas que exhiban las supuestas relaciones entre las diversas teorías, no hay *pruebas* de que tales relaciones, de hecho, valgan. Y no hay pruebas porque no se ha advertido que tales enunciados metateóricos *requieren* una prueba. Y, aun si se reconoce la necesidad, ignoramos por completo cómo proceder con semejante prueba: los instrumentos están ahí pero no los manejamos diestramente.

Este capítulo tiene tres objetivos. Uno es revisar algunos de los instrumentos requeridos para explorar las relaciones entre las teorías físicas. Otro es exhibir la riqueza de las relaciones interteóricas, con la esperanza de que ello pueda servir como recordatorio de la complejidad y estado atrasado del problema —por lo tanto, como estímulo para su planteamiento profundo y unificado. El tercer objetivo será mostrar que muchos de los problemas concernientes a las relaciones interteóricas, que científicos y filósofos usualmente consideran resueltos, apenas si se han planteado de modo correcto.

1. Estado actual del problema

1.1. *Tres estudios paralelos*

Al igual que con otros problemas metacientíficos, tanto científicos como filósofos han contribuido a la literatura sobre relaciones entre teorías. Y, como es usual, ambos grupos han hecho todo lo posible por ignorarse entre sí. En este caso, se las han arreglado también para ignorar a un tercer grupo, que resulta ser el más articulado de todos: a saber, los lógicos y matemáticos que han creado el cálculo de teorías, la teoría de modelos y la teoría de las categorías, y han estudiado las relaciones formales entre los sistemas hipotético-deductivos. El resultado desafortunado de esta falta de comunicación entre los tres grupos es que tenemos tres conjuntos disyuntos de estudios. Es tarea urgente de los metacientíficos entretejer estos tres hilos separados con el fin de producir un cuadro unificado de las relaciones interteóricas.

Los científicos interesados en este problema se han ocupado casi exclusivamente de un tipo de relación interteórica, a saber, la que existe cuando dos teorías cuyo referente propuesto es prácticamente el mismo (recuérdese el capítulo 4) poseen extensiones diferentes, y cuando ciertos parámetros característicos de una de ellas tienden a un límite, v. g., cuando la velocidad de la luz en el vacío se supone infinita, o cuando la constante de Planck se anula. Si bien que éste es un caso interesante e importante, no agota las relaciones entre las teorías. Es más, todavía no ha sido tratado de modo general y riguroso.

Los filósofos, de quienes se espera examinen todos los lados del problema, se han concentrado en la reducción de teorías. Esto, aunque del mayor interés para la metodología y la metafísica, es, de nuevo, sólo un aspecto de la cuestión. Y, aun restringiéndonos a este respecto, los filósofos han sido con frecuencia culpables de un exceso de simplificación: han omitido las dificultades técnicas a que se hace frente en la mayoría de las tentativas de la reducción. Un ejemplo típico es el alegato de que la mecánica de los sólidos es reductible a la mecánica de partículas.

Los lógicos y metamatemáticos han hecho por ahora las contribuciones más fidedignas al tema. Pero no cabía esperar que cubriesen el

campo entero, que cuenta con diversas regiones no formales. Incumbe al filósofo unificar los diferentes puntos de vista.

1.2. *La contribución del filósofo*

Los escritos filosóficos sobre la reducción pueden clasificarse en dos conjuntos disyuntos: los que mencionan presuntos casos de reducción y hacen comentarios sobre ellos sin haberse asegurado de su autenticidad y sin analizar el proceso reductivo, y los que se molestan en analizar algunos de tales casos y pueden, por consiguiente, ofrecer observaciones penetrantes (Nagel, 1961, y Feigl, 1967). En cualquier caso, los filósofos interesados en la reducción parecen dar por supuesto que la ciencia abunda en reducciones exitosas: que la termodinámica ha sido completamente reducida a la mecánica estadística; que la mecánica de los cuerpos rígidos se ha reducido a la mecánica de las partículas; que la mecánica clásica ha sido reducida a la mecánica cuántica; que toda teoría relativista posee al menos y a lo sumo un límite no relativista, y así sucesivamente. Lamentablemente, tal es también, la impresión dada por la mayoría de los trabajos de popularización, notablemente los libros de texto elementales —la única fuente de información accesible a la mayoría de los filósofos. Mas, ¡ay!, no es ésta la impresión que produce la literatura original. De hecho, no se conoce ninguna derivación rigurosa del segundo principio de la termodinámica: sólo la termodinámica del gas ideal —un caso muy especial— se ha reducido por ahora a la dinámica molecular. En cuanto a los cuerpos rígidos, la mecánica de partículas no puede dar cuenta de su existencia, puesto que las "partículas" en cuestión son sistemas cuánticos y "pegadas" por campos, que son extraños a la mecánica de partículas. Tampoco la mecánica cuántica recupera la mecánica clásica en ningún límite: recupera sólo algunas fórmulas de la mecánica de partículas, ninguna de la mecánica del continuo, que es el grueso de la mecánica clásica. Finalmente, algunas teorías relativistas carecen de límites no relativistas, mientras que otras tienen más de uno. Abordaremos estos problemas más adelante. Baste ahora con decir que ningún examen detallado de los muchos casos alegados de reducción teórica se encuentra en la literatura filosófica, y que ninguno ha-

brá en la medida en que se ignore la literatura técnica sobre el tema.

No obstante, hay unos cuantos estudios filosóficos fructíferos sobre la reducción. El más importante e influyente de ellos ha sido el de Nagel (Nagel, 1961). Según Nagel, hay dos tipos de reducción: *homogénea e inhomogénea.* En el primer caso, los dominios de hechos de las dos teorías en cuestión son cualitativamente homogéneos (v. g., ambos se ocupan de redes neurales), mientras que en el segundo caso no lo son (v. g., uno se ocupa de sucesos mentales y el otro de redes neurales). Correspondientemente, en la reducción homogénea todos los conceptos de la teoría secundaria o reducida T_2 están presentes en la teoría primaria o reductora T_1. Por consiguiente, la reducción conduce en este caso a una deducción lógica de T_2 a partir de T_1. Un ejemplo de ello es la reducción de la mecánica de partículas a la mecánica de cuerpos deformables.

En cambio, en la reducción inhomógenea se trata de dos campos cualitativamente diferentes de hechos, de suerte que incluso si se efectúa una reducción, la teoría secundaria T_2 no queda meramente subsumida bajo la teoría primaria T_1. Lejos de ellos, aquí al menos uno de los conceptos que figuran en la teoría reducida T_2 está ausente del conjunto de conceptos básicos de la teoría reductora T_1. Por ejemplo, los conceptos termodinámicos de temperatura y entropía no se hallan presentes entre los conceptos básicos de la teoría cinética de los gases. Por consiguiente, no cabe, a partir de la última teoría, deducción alguna de enunciados termodinámicos. A fin de efectuar la reducción, hay que introducir postulados adicionales. Estas suposiciones adicionales que no están contenidas ni en T_1 ni en T_2, vinculan todos los términos particulares de T_2 con algunos términos en T_1, por lo que pueden llamarse hipótesis puente o inter-teóricas. Así, en la teoría cinética de los gases hay que postular la relación entre la energía cinética media de las moléculas y la temperatura, y esta suposición adicional no es una definición sino una nueva hipótesis sintética (factual).

Hasta aquí, todo va bien. Pero una vez que la teoría secundaria ha sido enriquecida y organizada adecuadamente (esto es, formulada axiomáticamente), su relación con la teoría primaria se convierte en una relación puramente lógica. En otras palabras, la distinción homogéneo-heterogéneo es de naturaleza histórica o heurística: mientras que se halla presente en la fase de construcción de la teoría, en la

consideración metateórica de los productos acabados desaparece. Por lo tanto, el trabajo pionero de Nagel sobre la reducción de teorías debería reconstruirse y expandirse en una perspectiva axiomática. Pues, aun si una formulación axiomática de una teoría puede no enriquecerla esencialmente, siempre la esclarecerá y, en particular, facilitará la formulación clara de problemas acerca de la teoría.

Pasemos ahora a otros aspectos de la cuestión: hagamos una revisión crítica de lo que se ha hecho y presentemos un *aperçu* de las tareas que tenemos por delante.

2. Relaciones interteóricas asintóticas

2.1. *La noción intuitiva: su inadecuación*

La situación usual en la ciencia es preaxiomática. Incluso cuando se comparan dos o más teorías rivales, rara vez si alguna, se formulan de manera ordenada. De ahí que, en vez de llevar a cabo una comparación *sistemática* de teorías íntegras, se confronten dos o más puñados de conceptos y enunciados típicos. Este análisis fragmentario se emplea entonces como trampolín para las conclusiones generales acerca de las relaciones lógicas entre las teorías.

Más aún, la comparación de teorías se restringe a menudo a los valores *asintóticos* de ciertas funciones o a las formas asintóticas de ciertos enunciados, como cuando se dice que la geometría riemanniana tiende a la geometría euclídea como cuando el tensor métrico tiende a un tensor diagonal constante, o cuando una teoría relativista especial *RE* se acerca a la correspondiente teoría no relativista *NR* según que las velocidades v de las partículas en cuestión sean despreciables comparadas con la velocidad c de la luz en el vacío. El metateórico amateur tratará entonces la teoría como un todo y más aún *como si* fuera una función, escribiendo fórmulas mal formadas tales como

[1] $$\lim_{v \ll c} RE = NR$$

y, en general,

[2] $$\lim_{p \to a} T_1 = T_2$$

donde p es algún parámetro característico. Pero ciertamente, esto es sólo una *metáfora*, pues una teoría no es una función sino un conjunto de enunciados. Más aún, la reducción (de T_2 a T_1) *no* siempre se logra cuando algún parámetro se aproxima a algún valor límite.

2.2. *Límites no relativistas: En ocasiones inexistentes, en ocasiones múltiples*

Se cree usualmente que toda teoría relativista posee exactamente un límite no relativista, de suerte que si se toma éste, todos los "efectos" de segundo orden y de órdenes superiores se pierden conservándose, en cambio, el grueso de los hechos, los "efectos" de primer orden. Mostraremos ahora que, mientras algunas teorías relativistas carecen de "límite" no relativista, otras tienen más de uno, de modo que la creencia en cuestión es falsa.

La teoría electromagnética de Maxwell para el espacio libre de materia es una teoría relativista —más aún, lo fue así *avant la lettre*— y además no tiene límite relativista. De hecho, las ecuaciones básicas de esta teoría no contienen la velocidad mecánica v, por lo que no tiene objeto tomar el límite de las funciones implicadas para $v \ll c$. Y, en cuanto a tomar como límite de dichas funciones para c tendiendo a infinito, carece de sentido alguno pues nos deja con la subteoría de los campos estáticos, borrándose la peculiaridad del electromagnetismo, que es la inducción electromagnética. En resumen, no hay aproximación no relativista de la teoría electromagnética de Maxwell: hay sólo subteorías no relativistas (electrostática y magnetostática), y las aproximaciones no relativistas de la electrodinámica (lo que es una historia diferente). Este simple resultado metateórico es importante porque refuta los mitos según los cuales (*a*) la relatividad es sólo cuestión de "efectos" de orden superior (un refinamiento cuantitativo necesario sólo para fenómenos de alta energía), y (*b*) toda teoría relativista posee exactamente un "límite" no-relativista que cubre esencialmente los mismos hechos.

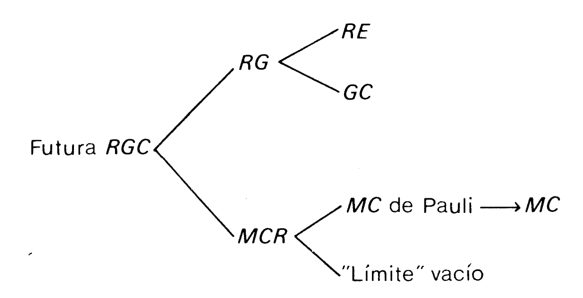
En cuanto a la existencia de múltiples límites no relativistas, el caso más simple es el de la relatividad general, o *RG* en siglas. La *RG* tiende a la *RE* cuando desaparece la gravitación (equivalentemente:

para el espacio chato), pero se convierte en la teoría clásica de la gravitación *GC* (de Newton y Poisson) para campos estáticos débiles y movimientos lentos. (Hay en rigor un tercer límite, a saber, cuando se anula el tensor materia. En este caso, el espacio-tiempo aún puede ser riemanniano, y no se obtiene ninguna teoría física anterior pues no quedan ni materia ni campos electromagnéticos. Pero este caso parece no tener interés físico, tanto por no corresponder a situaciones reales cuanto por no concordar con ninguna teoría física previa: es un límite factualmente vacío.)

Tiene algún interés advertir que el límite *GC* de la *RG* no se obtiene haciendo tender c a infinito en todas las fórmulas. En efecto, una de las especializaciones efectuadas para obtener este límite clásico (o, más bien, semiclásico) es que todos los coeficientes del tensor materia se anulen salvo el componente 00, que se iguala a m_0c^2. La existencia de dos límites diferentes y no vacíos de la *RG* tiene también interés en cuanto que reivindica la tesis de Einstein (negada por Fock) de que la *RG* es una generalización de la *RE*; pero también Fock está parcialmente en lo cierto al alegar que la *RG* es una generalización de la *GC*. En la medida en que se mantenga el credo del límite único, se considerará que o bien Einstein o bien Fock poseen la verdad toda en lo concerniente a la naturaleza de la *RG*. Finalmente, si una teoría cuántica de la gravitación tuviera éxito, tendría presumiblemente al menos dos límites diferentes: la *RG* bien sea para $h \to 0$ bien para $T_{\mu\nu} = \langle T_{\mu\nu}^{QM} \rangle$ y la *MC* relativista para la ausencia de gravitación.

En cuanto a la teoría cuántica del electrón de Dirac, hay dos maneras de obtener un "límite" no relativista de la misma. Una es el procedimiento standard de despreciar todos los operadores cuyos valores propios (o cuyos promedios) son del segundo orden en v/c o superiores; la otra es conservar estos operadores al tiempo que se renuncia a los "pequeños" componentes de los spinores de estado, esto es, aquellos que son del orden de v/c por las componentes de los spinores "grandes". No es de sorprender que se obtengan dos "límites" completamente diferentes: el primer procedimiento produce esencialmente la teoría no relativista de Pauli de la partícula con spin, mientras que el segundo procedimiento conduce a una ecuación que contiene un término spin-órbita ausente de la primera. Este segundo límite parece ser factualmente vacío, lo que refuta otra creencia popular, a saber,

que todo "límite" de una determinada teoría cubre un subconjunto de hechos de la primera. En cuanto al primer límite (la teoría de Pauli), se reduce a la teoría de Schrödinger dejando de lado el operador de spin. La situación hasta aquí se resume en el diagrama que sigue. No se ponen flechas tras la *RE* y la *MC* porque todavía no se comprenden bien las relaciones de estas teorías generales con las más especiales que se supone subsumen. En particular,



no se sabe cómo obtener la totalidad de la mecánica clásica (esto es, la mecánica de continuos) bien sea de la *RE* bien de la *MC*, aun si todo manual, y por lo tanto casi todo filósofo de la ciencia, toman estas reducciones como *fait accompli.*

2.3. *La teoría asintótica puede no coincidir con la teoría más antigua*

Acabamos de refutar por medio de contraejemplos, el mito de los manuales de que toda teoría relativista se convierte en una teoría clásica no vacía singular cuando $c \to \infty$(o, mejor, $v \ll c$). Lo que es más, la aproximación no relativista resultante puede retener algunos términos típicamente relativistas, de suerte que no podría posiblemente concordar en detalle con la correspondiente teoría clásica. Tal vimos en la transición $RG \to GC$. La relatividad especial presenta un caso similar: en la aproximación del movimiento lento la energía total de una partícula se reduce a la energía en reposo $m_0 c^2$ en lugar de desaparecer, como debería suceder si, de hecho, la dinámica relativista especial concordara con la dinámica clásica para velocidades pequeñas. Es más, la teoría más débil puede contener aspectos totalmente ajenos a

la teoría más fuerte. Así, las leyes de simetría (y las correspondientes ecuaciones de conservación) características de la *RE* carecen de contrapartida en la *RG*, pues los espacios riemannianos carecen de simetrías globales. En otras palabras, la teoría más débil puede no estar incluida en la más fuerte aun si las dos tienen una intersección no vacía —pues, de lo contrario, el concepto mismo de fuerza teórica sería inaplicable.

Parecería, pues, que más que habérnoslas con parejas de teorías, la una clásica *C* y la otra revolucionaria *R*, hacemos, frente a éstas más a un conjunto *NR* de "límites" no revolucionarios de *R* —donde "revolucionario" significa aquí "relativista", "cuántico", o, acaso, algún tipo futuro de teoría. Las relaciones entre estas tres teorías, consideradas como conjuntos de fórmulas, parecerían ser las siguientes:

[3] $NR \subset R$ y $NR - C \neq \emptyset$.

Estos metateoremas excesivamente modestos, por plausibles que sean, no han sido probados ni siquiera en un solo caso. Y, con todo, tales fórmulas, mejor que las fórmulas mal-formadas [1] y [2], tienen sentido y podrían concebiblemente probarse —no antes, sin embargo, de axiomatizar las teorías en cuestión.

2.4. *Los límites clásicos de la Teoría Cuántica: no bien conocidos*

La situación es más complicada aún en la teoría cuántica. En este caso se pueden hacer las siguientes comparaciones: (*a*) valores propios cuánticos vs. valores clásicos posibles; (*b*) promedios cuánticos vs. valores clásicos posibles; (*c*) operadores cuánticos vs. variables dinámicas clásicas. Las dos primeras comparaciones no son tan fáciles de hacer como habitualmente se cree. Para empezar, ¿qué teoría clásica hay que tomar en consideración: la mecánica de partículas clásica, la mecánica clásica del continuo, la electrodinámica clásica, o qué? Luego, ¿qué límites habría que tomar? ¿Debería uno igualar la constante de Planck a cero —y perder entonces el spin, que posee una contrapartida clásica? ¿O habría que tomar masas muy grandes— lo que carece de sentido para microsistemas? ¿O, finalmente, habría que

tomar la aproximación del gran número cuántico, que tiene sentido sólo para estados ligados (espectros discretos)? En cuanto a las variables dinámicas mismas, todo lo que uno obtiene son algunas analogías heurísticamente fértiles y psicológicamente confortables, pero no mucho más que esto. La comparación clásico cuántica, en resumen, está lejos de ser asunto sencillo.

Una de las dificultades que presenta la comparación es que el espacio de Hilbert infinitamente dimensional, que representa los estados del sistema, carece de límite clásico. En este respecto, la *MC* es mucho más radicalmente nueva que cualquier otra teoría no clásica. (Sólo la fase del vector de estado de un sistema parece clásica, en cuanto que su ecuación de evolución es similar a la ecuación de Hamilton-Jacobi. Pero entonces no hace falta que ésta concierna a un sistema mecánico.) Si uno se centra en el vector de estado olvidando los operadores, tenderá a interpretar la *MC* como una teoría de campo, mientras que si se centra en las variables dinámicas tenderá a interpretarla como una teoría extraña de partículas impares. Pero, claramente, éstos son sólo análogos clásicos parciales: la teoría como totalidad carece de análogo clásico.

Es más, la *MC* y la *MCL* no se construyeron para dar cuenta de los mismos problemas: no se estructuró la primera para plantear y responder cuestiones de cinemática, tales como la trayectoria de un electrón en un sistema de ranuras (la clásica "medición" discutida cualitativamente en las primeras páginas de los manuales y luego rápidamente olvidada). La tarea de los constructores de la *MC* era esencialmente dar cuenta de la existencia, estructura y espectros de los átomos. El resto —una peculiar dinámica, la teoría molecular, y la teoría nuclear— vino como regalo. Consecuentemente, los padres fundadores de la *MC* no ampliaron la mecánica, ciencia del movimiento: concibieron una teoría radicalmente nueva. La nueva teoría se denominó *mecánica* debido problablemente a las creencias erróneas (*a*) de que toda teoría hamiltoniana es mecánica y (*b*) que una teoría fundamental debe ser una especie de mecánica —más que, digamos, una teoría de campo. Y aun así, los fundamentos de la *MC* se discuten a menudo a la luz de experimentos (imaginarios) concernientes al movimiento de "partículas" mediante sistemas de ranuras. No hay que sorprenderse de que tales discusiones sean estériles.

Sea de ello lo que fuere, los diagramas de reducción de las teorías cuánticas de la materia, la mecánica cuántica básica *MC* y la mecánica cuántica estadística *MCE*, se dice a menudo que se correspoden así:

$$\begin{array}{ccc} MCE & \rightarrow & MC \\ \downarrow & & \downarrow \\ MCLE & \rightarrow & MCL \end{array}$$

siendo "*MCLE*" y "*MCL*" la mecánica clásica estadística y la mecánica clásica respectivamente. (Para enunciados y diagramas como éste, véase Tisza, 1962 y Strauss, 1970.) Desgraciadamente, nadie parece haber *probado* que tales relaciones valgan. Para empezar, no hay prueba alguna disponible de la reducción de la *MCLE* a la *MCL* (véase, no obstante, la sección 2.6 para un intento en esta dirección). Tampoco hay prueba alguna de que la *MC* se convierta en la *MCL*. Las únicas pruebas disponibles conciernen a unos pocos enunciados aislados, tales como los teoremas de Ehrenfest y algunas fórmulas que implican números cuánticos totales. Pero esto queda lejos de una prueba sistemática de la teoría toda. Más aún, aunque la *MC* se compara usualmente con la mecánica clásica de *partículas* (pues hoy sólo los ingenieros están familiarizados con la totalidad de la mecánica), parece obvio que debería compararse más bien con la mecánica de los cuerpos *continuos*, tanto debido a la presencia de condiciones de contorno cuanto porque, en las teorías cuánticas relativistas, pueden definirse tensores de tensión. Además, a diferencia de las teorías de campo cuánticas y a diferencia de la *MCL*, la *MC* presupone y emplea la teoría electromagnética clásica de Maxwell. Por lo tanto, no podría pasar posiblemente a la *MCL* en ninguno de los "límites clásicos" discutidos anteriormente, a menos que se llevara a cabo la restricción a campos nulos —en cuyo caso, no cabría dar cuenta de la existencia misma de los cuerpos. Finalmente, cabe argüir que la *MC* es un límite de la *MCL* enriquecida con ciertas suposiciones estocásticas concernientes v. g., a una fuerza aleatoria ejercida sobre el sistema por el entorno (de la Peña-Auerbach, 1969). En resumen, sabemos muy poco acerca de las relaciones *MCL-MC*. Y es un error pretender que las entendemos, pues ello nos impide toda investigación seria del asunto.

2.5. *La relación determinista-estocástica*

Una teoría estocástica es lógicamente más potente que la correspondiente teoría o teorías no estocásticas: $NE \subset E$. El "límite(s)" no estocástico de una teoría estocástica puede obtenerse, en principio, de uno de los siguientes modos no equivalentes. Uno, es igualar todas las probabilidades que figuran en la teoría estocástica a 0 ó 1. Una segunda línea es suponer que las diversas distribuciones de probabilidad se concentran en sus promedios. Un tercer método es remplazar todas las variables aleatorias por otras no aleatorias, por ejemplo, poner

$$[4] \qquad \frac{dX}{dt} = kX \qquad \text{o} \qquad X_{t+1} - X_t = kK_t$$

en lugar de las fórmulas probabilísticas

$$[5] \qquad \frac{dp}{dt} = kp \qquad \text{o} \qquad P_{t+1} - P_t = kp_t.$$

No hay, desde luego, garantía de que ninguno de estos métodos produzca un resultado razonable, esto es, una teoría más débil que valga al menos en una primera aproximación. En particular, para que valga el segundo método, los promedios deben ser realmente estables o casi. Y, aun así, sólo el primer método producirá una teoría contenida en la determinada teoría estocástica. En efecto, en este caso se obtiene la teoría más débil sin alterar los conceptos básicos, mientras que los otros dos métodos implican cambiar la naturaleza misma de algunos de los conceptos básicos: no sólo producen una especialización de la teoría estocástica dada sino teorías radicalmente nuevas. Por lo que es probable que sean mucho más útiles que el primer método.

El caso de la presunta reducción de la termodinámica a la mecánica estadística merece una sección especial.

2.6. *La reducción de la termodinámica: programa, no hecho*

El paradigma de la reducción teórica en los libros de texto es, desde luego, la presunta reducción de la termodinámica a la mecánica estadística. Usualmente esto se lleva a cabo, o más bien se intenta, enriqueciendo las ecuaciones básicas de la mecánica clásica del *punto* (que, erróneamente, se supone da cuenta del comportamiento de átomos y moléculas) con hipótesis estocásticas concernientes a las condiciones iniciales caóticas —o, más bien, sobre la irrelevancia del estado inicial preciso. Sería sorprendente que esta treta valiese en general, pues se sabe que átomos y moléculas no son partículas puntuales sin estructura sino sistemas cuánticos enormemente complejos encolados por campos, que son entes no mecánicos.

De hecho, la estratagema no sirve en general: sólo la teoría cinética elemental —que ignora el 2.º principio de la termodinámica— y algunas fórmulas termodinámicas han sido obtenidas de este modo. La termodinámica como un todo, y particularmente el 2.º principio, que es su aspecto más distintivo, no ha sido reducida a la mecánica de partículas —ni, por tal razón, lo han sido la dinámica de fluidos, la mecánica de los cuerpos deformables, y otras ramas de la física del continuo. La reducción de la termodinámica no es un hecho sino un programa.

Más aún, no hay acuerdo entre los especialistas en cuanto a cómo podría cumplirse en general una reducción de la termodinámica —no sólo para gases en gamas muy especiales de presión y temperatura. Una posible línea de ataque es tratar de obtener la termodinámica y otras teorías de los cuerpos a partir de la *MC* sin la ayuda de alguna de las usuales hipótesis estocásticas auxiliares, mostrando que éstas son redundantes, siendo implicadas por las leyes mecánicas básicas del movimiento. Ésta es la tesis de Grad (Grad, 1967). En particular, Grad alega que es innecesario introducir perturbaciones aleatorias que vengan del mundo externo para explicar la irreversibilidad —la vía propuesta por Blatt, Kac y otros. El agregado de hipótesis accesorias (usualmente estocásticas) tales como la del caos molecular, y la de que la probabilidad es proporcional al volumen en el espacio de fases, es considerada por Grad como conveniente y posiblemente inevitable

en el estado actual de la investigación, pero prescindible en principio, pues la aleatoriedad nace del entrejuego de numerosos entes de un mismo tipo más que injertada desde el exterior. Las dificultades para probar que ello es así, esto es, que la leyes del movimiento son suficientes para reproducir todos los aspectos estocásticos, serían sólo técnicas: concernerían sólo al manejo de grandes sistemas de ecuaciones diferenciales, algunas de cuyas propiedades se aproximan al comportamiento aleatorio. Si Grad está en lo cierto, entonces la reducción de (algunos capítulos) de la termodinámica a la mecánica es más bien homogénea que heterogénea. (Recuérdese la sección 1.2.)

Ahora bien, la motivación del programa de Grad parece ser doble. Una es puramente técnica, a saber, la manera insatisfactoria en que se introducen la mayoría de las suposiciones estocásticas y las sucias matemáticas implicadas en la mayoría de las aproximaciones. La segunda razón parece filosófica: la reducción lograda hasta aquí (que es parcial e incluso cuestionable) es de tipo heterogéneo, mientras que si la mecánica se considera como la teoría básica la reducción debería ser homogénea, esto es, debería ser una deducción directa.

En cualquier caso, Grad ha obtenido ya algunos resultados notables, y deberíamos esperar a ver otros más antes de juzgar su planteamiento del problema de la reducción. Una cosa, sin embargo, parece indiscutible: puesto que los constituyentes elementales de la materia no se comportan clásicamente sino más bien cuánticamente, la materia no puede ser explicada en términos de partículas clásicas, esferas duras, u otros modelos clásicos. Lo que deberíamos buscar es una derivación de la mecánica del continuo y la termodinámica a partir de la *MC*. Éste todavía es un programa aun cuando la mayoría de los físicos y los filósofos se encuentran bajo el engaño de que se ha cumplido.

2.7. *Una conclusión poco estimulante*

El remate de nuestra rápida revisión de la noción intuitiva o asintótica de relación interteórica es decepcionante: la relación asintótica no ha sido rigurosamente elucidada, es mucho más compleja de lo que habitualmente se supone y, lo que es peor, está lejos de haber sido establecida en casos que vulgarmente se consideran como cerrados.

Los hermosos diagramas de reducción que se encuentran en la literatura científica y metacientífica son, en su mayoría, hueros y, en todo caso, no han sido analizados.

Ocupémonos de otros tipos mejor comprendidos de relaciones interteóricas.

3. Relaciones formales interteóricas

3.1. *Las relaciones formales posibles*

Desde un punto de vista formal (lógico-matemático), dos teorías pueden encontrarse en las relaciones siguientes: (1) isomorfismo o, más generalmente, homomorfismo; (ii) equivalencia lógica (pero no necesariamente semántica), (iii) inclusión, y (iv) recubrimiento parcial. (Si el recubrimiento es vacío, las teorías no están relacionadas.) A fin de descubrir cuál, si alguna, de estas situaciones prevalece en un caso dado, las teorías en cuestión deben axiomatizarse, pues de lo contrario uno no sabría exactamente qué es lo que se está comparando.

Ahora bien, lo primero que es preciso hacer al presentar una fundamentación axiomática de una teoría es exhibir su base primitiva o conjunto de conceptos básicos (indefinidos). Salvo las teorías elementales o de primer orden, que son insuficientes en la ciencia factual, la base primitiva de una teoría factual T expresada en el lenguaje de la teoría de conjuntos consiste de un n-tuplo constituido por los siguientes conceptos: un conjunto Σ y n-1 predicados específicos básicos y mutuamente independientes (no interdefinibles) P_i. El conjunto Σ, en ocasiones un producto cartesiano de dos o más conjuntos, es la clase de referencia de T, esto es, la colección de sistemas a los que, se supone, T se refiere. Y el predicado m-ario P_i^m representa la $i$ésima propiedad de los miembros de Σ. Más precisamente, si $\sigma_1, \sigma_2, \ldots, \sigma_m$ están en Σ, entonces $P_i^m(\sigma_1, \sigma_2, \ldots, \sigma_m)$ vale en T o no vale en T, en cuyo caso y si T es factualmente verdadera, la fórmula vale también para las cosas mismas. (Esta caracterización de la base de una teoría factual es ingenua, puesto que implica el concepto de verdad total. Pero su extensión al caso de verdad parcial, que es el realista, no necesita ocuparnos aquí.)

Consecuentemente, dadas dos teorías, T_1 y T_2, su comparación sistemática empieza comparando sus bases primitivas.

[6] $B(T_1) = \langle \Sigma_1, P_1 \rangle$ y $B(T_2) = \langle \Sigma_2, P_2 \rangle$

donde las P designan ahora manojos enteros (en realidad sucesiones) de predicados.

3.2. *Isomorfismo y homomorfismo*

Dos teorías son isomórficas (homomórficas) si hay una correspondencia unívoca (muchos-uno) entre sus respectivas clases de referencia y conjuntos de predicados tal que se preserve la estructura de estos conceptos básicos, esto es, tal que los conjuntos se hagan corresponder a conjuntos, los predicados unarios a predicados unarios, y así sucesivamente. La naturaleza precisa de semejante correspondencia depende de la estructura de los predicados básicos, de suerte que no cabe dar ninguna definición general de isomorfismo (o de homomorfismo), esto es, una definición que convenga a toda posible teoría factual. Y toda definición especial requiere la axiomatización previa de la teoría, pues, de lo contrario, no se individualizarán sus primitivos. (La forma precisa de los axiomas es irrelevante para los propósitos de probar el isomorfismo o el homomorfismo: lo que es esencial es dar la base primitiva y delinear la estructura gruesa de sus componentes.)

Ahora bien, no hay en la literatura física sino un solo caso en el que se haya alegado el isomorfismo de dos teorías. Es el de la mecánica ondulatoria (o la "imagen" de Schrödinger de la *MC*) y la mecánica matricial (o la "imagen" de Heisenberg de la *MC*). No obstante, la prueba disponible está lejos de ser rigurosa, pues toda prueba de isomorfismo requiere a la vez la axiomatización previa de las teorías en cuestión y la introducción de una definición *ad hoc* de isomorfismo de la teoría —ninguna de las cuales se hallaba disponible cuando se presentó la prueba de isomorfismo hace cuarenta años. Esa prueba fue entonces más heurística que formal. Más aún, existe la sospecha, puesta de relieve recientemente por Dirac, que las dos teorías no son equivalentes. Lo que, de ser verdad, debería constituir una adverten-

cia más de que los problemas de investigación de fundamentos no deberían enfocarse a la manera del aficionado.

3.3. *Equivalencia*

Dos teorías con diferentes bases primitivas y, más aún, definidamente heteromórficas, pueden con todo compartir sus fórmulas. Las dinámicas hamiltonianas y lagrangianas están en este caso; aunque su estructura defiera debido a sus diferentes bases primitivas, sus fórmulas pueden traducirse entre sí con sólo facilitar el código adecuado de traducción (v. g., $H = p\dot{q} - L$). En otras palabras, en cuanto conjuntos de fórmulas estas teorías son la misma teoría. Esto rige, desde luego, para dos formulaciones o representaciones diferentes cualesquiera de la misma teoría: aunque posiblemente heteromórficas, son lógicamente equivalentes.

3.4. *Inclusión o reducción formal*

T_2 es una *subteoría* de T_1 (equivalentemente: T_1 es una *extensión* de T_2) si (*a*) T_2 es una teoría, esto es, un conjunto de fórmulas cerrado bajo deducción —lo que no será todo subconjunto de T_1, y (*b*) todas las fórmulas de T_2 están también en T_1 pero no a la inversa. Para decirlo de otra manera, sea $T_1 \dotplus T_2$ la unión de T_1 y T_2 en el sentido de Tarski (Tarski, 1956). Esto es, $T_1 \dotplus T_2$ es el conjunto de consecuencias lógicas de la unión de T_1 con T_2. Entonces podemos decir que

[7] T_2 es una subteoría de $T_1 \stackrel{\cdot}{=}_{df} T_1 \dotplus T_2 = T_1$,

esto es, T_2 no agrega nada a T_1. En otras palabras, T_2, en cuanto conjunto, está incluida en T_1 sólo en caso de que T_1 implique T_2 sin más, esto es, sin el agregado de hipótesis subsidiarias. Vemos entonces que la reducción homogénea en el sentido de Nagel (recuérdese la sección 1.2) coincide con la inclusión.

Ninguna de las definiciones anteriores de inclusión de teorías es efectiva en cuanto *criterio* para establecer la inclusión de teorías, pues se ocupan de conjuntos infinitos de fórmulas. Nos vemos obligados a

recaer en las bases primitivas de las teorías, que son conjuntos finitos: de hecho, son n-tuplos. (Recuérdese la sección 3.1.) Crudamente, puede decirse que T_2 es una subteoría de T_1 si (i) la base primitiva de T_2 está contenida en la de T_1, y (ii) todo axioma de T_2 es una fórmula válida de T_1. Más precisamente, T_2 se denomina *subteoría* de T_1 sólo en el caso (i) $B(T_2) \subseteq B(T_1)$ (recuérdese la fórmula [6]) y (ii) para todo predicado básico P_i^m en T_2, si P_i $(\sigma_1, \sigma_2, \ldots, \sigma_m)$rige en T_2, también vale en T_1.

(En general, los sistemas relacionales B (T_1) y B (T_2) no serán similares en el sentido de Tarski (Tarski, 1954). Por lo tanto, una condición necesaria para que uno de ellos sea subsistema del otro no tendrá lugar aun si rige la relación de subteoría en nuestro sentido. Esto es, suficiente pero no necesario, para que T_2 sea una subteoría de T_1, que B (T_2) sea un subsistema de B (T_1).)

3.5. *Constructos persistentes, restringidos y nuevos*

En relación con las diversas extensiones de una determinada teoría son tres las posibilidades para un constructo (concepto o enunciado).

(*a*) *Persistencia*: el constructo presente en la teoría débil pertenece también a toda extensión de la misma (Robinson, 1956). Ejemplo: el concepto de velocidad en la *MCL* y en sus extensiones no cuánticas. (Como vimos en la sección 2.4, la *MC* no puede considerarse como una extensión de la *MCL*.)

(*b*) *Extensión*: el constructo se expande de una teoría a la siguiente: si función, se define en un dominio más amplio o se le asigna un alcance más amplio; si enunciado, se amplía su referencia propuesta. Ejemplo: el concepto de masa en la mecánica relativista en comparación con el de la mecánica clásica.

(*c*) *Emergencia*: el constructo es nuevo en una de las extensiones de la teoría débil, de modo tal que carece de correlato en ésta. Ejemplo: el concepto de campo es emergente respecto de la mecánica clásica.

Se sigue que, para obtener una *subteoría* de una teoría dada, puede intentarse una cualquiera o ambas de las dos estrategias siguientes.

(*a*) *Restringir* una o más de las funciones originales a un dominio más estrecho —v. g., remplazar el conjunto continuo que representa un cuerpo por una colección de puntos aislados, y consiguientemente especializar las funciones de densidad a deltas.

(*b*) *Abandonar* por entero alguno de los conceptos primitivos y borrar los axiomas en que figuran —v.g., renunciar al tensor de tensiones (más que igualarlo a cero) como paso hacia la obtención de la mecánica de partículas a partir de la mecánica de continuos.

No hay táctica similar disponible para encontrar la extensión de una teoría determinada. Aquello de que disponemos es una colección de reglas heurísticas, que pueden o no valer, para relativizar las teorías no cuánticas y para cuantizar las teorías no relativistas. Pero éstas no nos conciernen aquí. Debemos ocuparnos ahora de las relaciones interteóricas no formales.

4. Relaciones interteóricas semánticas

4.1. *La relación de presuposición*

Toda teoría científica se "basa" en algunas otras teorías, tanto formales (lógicas y matemáticas) como no formales. Así, la óptica geométrica se basa en la geometría euclídea (a la vez que en otras teorías), en el sentido de que la primera hace libre uso de ella —de hecho, contiene la totalidad de la geometría euclídea. Decir que una teoría *A* se *basa* en otra teoría *B* significa que *A* presupone *B*, esto es, que *B* pertenece al trasfondo de *A*. Y una teoría *A presupone* otra teoría *B* en el caso de que se cumplan las condiciones (Bunge, 1967c):

(*i*) *B* es una condición necesaria para el significado o la verosimilitud de *A*, porque *A* contiene conceptos que se elucidan en *B*, o enunciados que se justifican en *B*, y

(*ii*) *B* no se cuestiona mientras se construye, elabora, critica, contrasta, o aplica *A* —esto es, *B* se toma por supuesto, *pro tempore*, en lo que a *A* concierne.

La relación de presuposición presenta entonces tres aspectos: un aspecto lógico y uno semántico (tenidos ambos en cuenta por la condición (*i*)) y una vertiente metodológica. Esta última se comprende

más fácilmente: nadie cuestiona todo a la vez, sino que cuestiona paso a paso. En cuanto a los aspectos lógico y semántico de la relación de presuposición, la mejor manera de ponerlos de relieve es mediante la axiomatización de una teoría A, pues el paso cero en este proceso de reorganización y reconducción es la exhibición del trasfondo total B de A. Si esto se hiciera más a menudo, las teorías científicas serían mejor comprendidas. Así, sólo cuando la cinemática relativista recibe una formulación axiomática, constata uno que el electromagnetismo de Maxwell es previo a ella, pues sin este supuesto la cinemática relativista especial no es significativa ni verdadera (Bunge, 1967b). Si este hecho concerniente a las relaciones interteóricas se conociera mejor, no nos veríamos anegados con libros sobre la relatividad que parten sea de la mecánica clásica sea de las transformaciones de Lorentz en lugar de partir de las ecuaciones de Maxwell.

4.2. *Presuposición y prioridad*

La anterior noción de presuposición teórica se relaciona con el concepto más débil de *prioridad teórica* esbozado por Church (Church, 1962). Así, la lógica es previa a las matemáticas en sentido débil, pues proporciona un marco lingüístico para el discurso matemático y mantiene bajo control las inferencias matemáticas. Pero —pese al logicismo— la lógica no es previa a las matemáticas en el sentido *fuerte* de que baste para construir las matemáticas: en efecto, toda teoría matemática, aún la más pobre (v. g., la teoría del orden parcial) posee al menos un predicado extralógico. En cambio, la teoría de conjuntos es, por el momento, previa a casi todo el resto de las matemáticas en sentido *fuerte*, pues proporciona los elementos de construcción específicos básicos (v. g., los conceptos de conjunto, n-tuplo, y función) empleados en construir casi toda teoría matemática. (Con anterioridad al nacimiento de la teoría de las categorías, fue posible sostener que la totalidad de la matemática era reductible a la teoría de conjuntos.)

Nótese que el concepto semántico de presuposición no coincide con el concepto pragmático o psicológico de prioridad. Así, la mate-

mática presupone la lógica desde un punto de vista semántico pero usualmente la matemática llega primero tanto histórica como metodológicamente, en el sentido de haber motivado la mayor parte de la lógica moderna y de que todavía proporciona el principal control y la principal justificación para la investigación lógica. Muy a menudo, la relación semántica de presuposición va contra la dirección pragmática o histórica. Así, aunque la mecánica de partículas vino antes que la mecánica de los medios continuos, ésta no presupone a aquélla sino que más bien es al revés.

Nótese también que hay que distinguir el concepto de presuposición de la implicación lógica, sea sintáctica ($\vdash$) o semántica($\models$). Si A es deducible de B entonces obviamente A presupone B en nuestro sentido, pues B es una suposición bajo la que A vale. Pero la recíproca no necesita valer: A puede no seguirse sólo de su trasfondo B —y, de hecho, en general no se sigue. Así la teoría de conjuntos, que presupone la lógica, no está implicada por ésta. Asimismo, la mecánica no se sigue de las solas matemáticas, y la cinemática relativista requiere postulados propios además de los de la teoría electromagnética clásica.

4.3. *Reconocimiento de la relación de presuposición*

Como mejor puede descubrirse si una teoría presupone otra es axiomatizando al menos la primera. De lo contrario, la dependencia semántica de una teoría respecto de la otra podría escapársenos. Así, se sostiene a menudo que la teoría de la matriz de dispersión es independiente de la mecánica cuántica y más aún que debería remplazar a ésta. Sin embargo, aun si el cálculo de la matriz de dispersión $S_l(k)=\exp[i2\delta_l(k)]$ pudiera realizarse siempre sin la ayuda de la mecánica cuántica (lo que no es el caso), todavía sería ésta necesaria para *interpretar* las diversas propiedades matemáticas de S como propiedades físicas del sistema o proceso en cuestión. Tomemos, por ejemplo, la propiedad matemática más obvia de S: su analiticidad (como función del impulso k) en el plano superior excepto a lo largo del eje imaginario. Para descubrir el significado de los polos de S se examina la solución asintótica de la ecuación de Schrödinger (el cora-

zón de la mecánica cuántica) para la dispersión por un campo central de alcance finito, esto es

$$\underset{r\to\infty}{u} \to (A/r) \operatorname{sen} \left(kr + \delta_l + l\frac{\pi}{2}\right) = (B/r)\,[e^{-ikr}\, e^{-il\pi/2} - S_l(k)\, e^{ikr}\, e^{il\pi/2}].$$

Para $k = i\varkappa$, con $\varkappa > 0$, $u \to e^{-\varkappa r}/r$, que —según la mecánica cuántica— concierne a un estado ligado en el punto $i\varkappa$. Pero dado que éste es el estado de un sistema de dos componentes, tenemos también esta otra interpretación: Un polo de la amplitud de dispersión representa un sistema compuesto ("partícula"), de suerte que la matriz S toda puede considerarse como un modelo (un objeto modelo) de un sistema compuesto. Debemos este descubrimiento a la teoría preexistente de la mecánica cuántica, que ha actuado, por consiguiente, como *proveedora de significado* (Bunge, 1964). Si la matriz S hubiera de convertirse formalmente en auto-suficiente más que dependiente de la teoría de Schrödinger, esta relación semántica de presuposición sería considerada como un accidente histórico, pues la teoría se sostendría sobre su propio pie. Pero dado que, hasta ahora, no hay axiomatización independiente satisfactoria de la teoría de la matriz de dispersión, no puede pretenderse que ésta sea auto-suficiente. Moraleja: Axiomatícese primero, enúnciense después los alegatos sobre la dependencia semántica, o independencia, de una teoría respecto de otra teoría.

4.4. *Cambios de significado: las tesis de Kuhn y Feyerabend*

Aun si las fórmulas de una teoría reducen a la mayoría o, incluso, a todas las fórmulas de otra teoría, y aun si ambas poseen la misma clase de referencia —esto es, si se ocupan de las mismas cosas— puede que no tengan exactamente los mismos *significados* pues, si las dos teorías son diferentes, dirán cosas diferentes de sus referentes. Así, la dinámica einsteniana y la newtoniana comparten la mayoría de sus enunciados (no todos) en lo que a velocidades bajas respecta, pero los términos implicados en ellas no poseen el mismo significado en todos los casos. Y este cambio de significado no puede remediarse, porque

arraiga en una diferencia estructural: así, mientras que las distancias en la relatividad dependen de un marco de referencia, en la mecánica clásica son independientes de cualquier marco de referencia.

De ahí que Kuhn (Kuhn, 1962) esté totalmente en lo cierto al señalar que las leyes de la dinámica de Newton *no* son derivables de las de Einstein: no es sólo cuestión de acuerdo cuantitativo en el límite no relativista, sino de un "desplazamiento de la red conceptual". Sólo que Kuhn propone su tesis de modo equívoco, al afirmar que "los referentes físicos" de las leyes eisntenianas difieren de las newtonianas, de suerte que el intento de recuperar éstas a partir de aquéllas "hemos tenido que alterar los elementos estructurales fundamentales de que está compuesto el universo al que se aplican" (p. 110). Esto significaría que las dos teorías no se refieren a la misma cosa —lo que es obviamente falso, puesto que ambas se refieren a partículas. La tesis de Kuhn es correcta si se la reformula del siguiente modo. En una revolución científica tanto la forma como el contenido de algunos conceptos científicos cambian. En ocasiones, un cambio conceptual corresponde a un cambio en el referente (v. g., el remplazo de las teorías del continuo por las teorías atomistas de la materia), en otras, el referente se mantiene (si bien no su modelo teórico) pero hay un cambio de significado. (Lo que, dicho sea de paso, refuerza la tesis de que la referencia de un constructo es sólo uno de los dos componentes de su significado; el otro es su intensión o contenido.)

La conocida tesis de Feyerabend sobre cambios de significado (Feyerabend, 1962) es más radical y menos defendible que la de Kuhn. "Lo que sucede cuando se hace la transición de una teoría restringida T_2 a una teoría más amplia T_1 (que es capaz de cubrir todos los fenómenos cubiertos por T_2) es algo mucho más radical que la incorporación de la teoría *intacta* T_2 al contexto más amplio de T_1. Lo que sucede es más bien un *remplazo* completo de la ontología de T_2 por la ontología de T_1, y un cambio correspondiente en los significados de todos los términos descriptivos de T_2 (con tal que estos términos aún se empleen)." Esta tesis posee su grano de verdad pero, tal como está, es inmadura e incluso inconsistente. Es inmadura porque contiene dos conceptos clave que su autor no elucida: uno es el concepto de cobertura de una teoría (que puede elucidarse [Bunge, 1967c]), el otro es el concepto de significado (y el concepto asociado

de ontología de una teoría) —que también cabe elucidar (véase la subsección siguiente). Es una pena que tesis tan revolucionaria se haya enunciado con la dejadez propia de la filosofía tradicional.

Peor: tomada literalmente, la tesis de Feyerabend es *contradictoria*, pues una teoría no puede declararse más amplia que otra y, al mismo tiempo, inconmensurable con ella en punto a significado. En efecto, si el cambio en semántica ("ontología") fuese tan completo como pretende Feyerabend, entonces la dos teorías no serían comparables en cuanto a su alcance: hablarían meramente de cosas diferentes. Por consiguiente, seríamos incapaces de delimitar cuál de ellas posee la cobertura más ampia. Pese a todo, como dije antes, hay un grano de verdad en la tesis de Feyerabend: a saber, que el progreso científico comporta cambios en el significado. Pero incluso tales cambios, bien que ocasionalmente radicales, no son tan radicales como piensa Feyerabend. El propio ejemplo favorito de Feyerabend apoya esta argumentación.

En efecto, cuando Feyerabend alega que "Es (...) imposible definir los conceptos clásicos exactos en términos relativistas" (Feyerabend, 1962 p. 80), olvida cómo se procede habitualmente para recobrar los conceptos clásicos a partir de los relativistas. Considérese por ejemplo el concepto de masa, que en la relatividad especial puede concebirse como una función

$$M_R : B \times U_M \times K \rightarrow R^+$$

que asigna a cada terna $\langle b, u, k \rangle$ formada por un cuerpo $b \in B$, una unidad de masa $u \in U_M$ y un marco de referencia $k \in K$, un número real positivo. Si se finge que la colección íntegra K de marcos de referencia se reduce a un referencial único r (el marco en reposo), se obtiene la definición buscada: el concepto clásico de masa es la función

$$M_C : B \times U_M \rightarrow R^+ \text{ tal que } M_C(b, u) = M_R(b, u, r).$$

Con los demás conceptos se procede en forma análoga (siempre que posean correlatos clásicos).

En conclusión, las revoluciones científicas no son tan violentas como las "revoluciones culturales", y la tesis de los cambios de signi-

ficado asociados con las revoluciones científicas es suficientemente importante como para merecer una atenta elucidación filosófica. (Para otras críticas, véase Shapere, 1966, Coffa, 1967, y Nagel, 1970.) Emprendamos esta tarea.

4.5. *Elucidación del concepto de cambio de significado*

Para aclarar el concepto de cambio de significado asociado con remplazos de teorías, debemos empezar por elucidar el concepto mismo de significado. Una de las elucidaciones posibles está dada por la siguiente definición que encapsula lo que llamo doctrina sintética del significado, pues combina intensión con referencia.

Sea c un concepto, proposición o teoría. Definamos el *significado* de c como su sentido o connotación junto con su referencia o denotación (Bunge, 1972c, 1974a, 1976b). En resumen,

$$\mathscr{M}(c) =_{df} \langle \mathscr{S}(c), \mathscr{R}(c) \rangle,$$

donde el sentido $\mathscr{S}(c)$ equivale al conjunto de fórmulas que implica c o implicados por c, mientras que la referencia $\mathscr{R}(c)$ es la colección de objetos a los que c refiere —dejando por completo de lado si se refiere correctamente a ellos. El conjunto de constructos que implican a c puede denominarse su *sentido ascendente (purport)* y la colección de constructos implicada por c su *sentido descendente (import)*. A mayor sentido descendente de un constructo, esto es, a menor dependencia de otros constructos, mayor importancia. Los constructos primitivos tienen sentido descendente máximo.

Una vez que tenemos el concepto de significado, tiene sentido elucidar el concepto de cambio de significado asociado con el de remplazo de un constructo c por otro constructo c'. Definamos el *cambio de significado* que acompaña tal remplazo como el par ordenado

$$\delta_{\mathscr{M}}(c, c') =_{df} \langle \delta_{\mathscr{S}}(c, c'), \delta_{\mathscr{R}}(c, c') \rangle,$$

donde la primera coordenada es el *cambio de sentido*:

$$\delta_{\mathscr{S}}(c, c') =_{df} \mathscr{S}(c) \, \Delta \mathscr{S}(c'),$$

y la segunda coordenada el *cambio de referencia*:

$$\delta_{\mathscr{R}}(c, c') =_{df} \mathscr{R}(c) \Delta \mathscr{R}(c'),$$

y el triángulo designa la operación de diferencia simétrica definida en la teoría de conjuntos.

Sea ahora T una teoría remplazada por la otra teoría T'. Habrá cambio neto de significado sólo en los siguientes casos: T es una subteoría de T' en el sentido de la sección 3.4, T y T' coinciden parcialmente o son totalmente disyuntas. Pero este último caso carece de interés como también su extremo contrario, a saber, el caso en que T y T' son sólo formulaciones equivalentes (sección 3.3) de la misma teoría. Dado que para todo par T, T' tenemos que habérnoslas con conjuntos infinitos de enunciados, el cambio de significado puede parecer que es por completo inmanejable. Esta dificultad se sortea restringiendo la cuestión a los axiomas de T y T'. Consecuentemente, las fórmulas anteriores se considerarán como concernientes a los conjuntos de postulados de T y T' respectivamente. Pero, claro es, ello no será bienvenido por los amantes de la bruma, para quienes la axiomática constituye una amenaza.

5. Relaciones interteóricas pragmáticas

5.1. *Relaciones heurísticas*

Las relaciones pragmáticas entre las teorías científicas pueden presentarse en más de un sentido, en ocasiones porque se buscan, pero la mayoría de las veces inesperadamente. Los principales tipos de relaciones interteóricas pragmáticas parecen ser los siguientes: (*a*) *heurístico*: una teoría sugiere o ayuda a construir otra teoría; (*b*) *metodológico del primer tipo*: una teoría es un instrumental para diseñar contrastaciones empíricas de otra teoría, (*c*) *metodológico del segundo tipo*: una teoría ("establecida") se considera como condición que debe satisfacer otra teoría ("nueva"), usualmente en algún "límite".

Los modos en que una teoría puede sugerir la construcción de otra son numerosos y se resisten a una clasificación estricta, pues dependen no sólo de las teorías mismas, sino también de la *forma mentis*

del teórico. Hay quien buscará inspiración en las matemáticas, quien tratará de generalizar de modo puramente formal, mientras que un tercer teórico reinterpretará una determinada teoría científica y un cuarto perseguirá ciertas analogías que otros no llegaron a "ver". No obstante, cabe hacer un par de observaciones generales.

La primera, que una relación heurística es, a menudo, en cierto sentido, la inversa de una relación lógica. Así, aunque la mecánica de partículas sea una subteoría de la mecánica del continuo, el proceso real (o, más bien, el intento) de construir teorías de los fluidos y sólidos ha conducido a menudo desde partículas a sistemas de partículas y de éstos a cuerpos continuos. En general, al intentar construir una teoría más rica se intentará pasar por encima de las teorías disponibles, que acaso se quiera convertir en subteorías de la nueva. Una segunda observación es que el andamiaje heurístico, comoquiera que hace uso de ideas prestadas de teorías preexistentes, debería ser examinado críticamente, y, si necesario, descartado una vez ha sido construida la nueva teoría. De lo contrario puede convertirse en un obstáculo a la formulación correcta, y por lo tanto a la comprensión de la nueva teoría. Baste recordar que la teoría de Faraday-Maxwell no se comprendió adecuadamente hasta comienzos de siglo, básicamente por haber arrastrado analogías mecánicas.

Una tercera observación es que una teoría potente puede ser fuente de inspiración no sólo de teorías más avanzadas sino también para la revisión de teorías previas. Así, la mecánica se vio bajo una nueva luz tras la constitución de las teorías de campo (Truesdell y Toupin, 1960). Bien sabido es que la física del estado sólido supo beneficiarse de la maquinaria matemática de la electrodinámica cuántica. Menos bien sabido es que la electrodinámica clásica puede dar cuenta de algunos efectos cuánticos si se incluye la energía de punto cero, típico término cuántico (Marshall, 1963, 1965, y Boyer, 1969a, 1969b). E incluso la segunda cuantización puede imitarse dentro de la teoría clásica (Schiller, 1967; Bourret, 1967). Por supuesto, todo esto es retrospección, por lo que no cabe usarlo como prueba de la suficiencia de la física clásica y de que por sí sola pueda explicar los supuestos misterios de la física cuántica. Lo que muestra es que las nuevas teorías no se apilan sobre la cima de las antiguas: en el proceso de crecimiento es la red toda de la física la que resulta transformada.

5.2. *Contrastaciones empíricas de una teoría con ayuda de otra*

Por cerca de la experiencia que parezca una cierta teoría, su contrastación empírica requerirá la ayuda de varias otras teorías que intervienen en el diseño y la lectura de los instrumentos científicos implicados en la contrastación. En otras palabras, toda situación experimental involucra dos conjuntos de teorías (o trozos de tales) (véase el capítulo 10):

(1) la teoría a ser contrastada (la teoría *sustantiva*), y

(2) una colección de fragmentos de teorías que den cuenta del dispositivo experimental (teorías *auxiliares*).

Los dos conjuntos de teorías pueden tener clases de referencia disyuntas: así, una teoría que concierna a la condensación del polvo cósmico tendrá que contrastarse con la ayuda de telescopios y otros instrumentos diseñados con la ayuda de porciones de la óptica y la mecánica. A medida que se introducen nuevas técnicas experimentales surgen relaciones pragmáticas inesperadas de este tipo. Ciertamente, Newton ignoraba los actuales equipos electrónicos y las computadoras que se emplean en la contratación de ciertas aplicaciones de su teoría del movimiento y gravitación (v. g., teorías lunares).

Que ninguna teoría basta para diseñar e interpretar sus propias contrastaciones, parece obvio dado el carácter polifacético de las mediciones. Pese a ello, es tácitamente denegado por quienes consideran la mecánica cuántica como concerniente sólo a situaciones experimentales (v. g., Bohr) o como proveedora de todos los materiales necesarios para construir una teoría cuántica general de la medición que, a su vez, proporcionaría una descripción exhaustiva de toda posible situación experimental (v. g., von Neumann). Si una cualquiera de estas tesis fuese verdadera, la mecánica cuántica sería la única teoría que no necesita de teorías auxiliares para sus contrastaciones. Pero los experimentadores parecen pensar de otra manera: consideran la mecánica cuántica como susceptible, en principio, de falsación mediante experimentos, que, además, se estructuran a la luz de un manojo de ideas más o menos claramente tomadas de otras teorías. En resumen, las teorías cuánticas no constituyen excepción a la regla de

que la contrastación empírica de toda teoría científica exige la intervención de varias otras teorías, de suerte que ninguna teoría científica se halla metodológicamente aislada del resto de la ciencia. Lo que está bien ya que, de lo contrario, no habría control mutuo.

5.3. *Contrastaciones empíricas de una teoría por medio de otra*

Algunas teorías no son empíricamente contrastables ni siquiera cuando se les agrega teorías auxiliares (en el sentido de la sección 5.2), sino que deben contrastarse *vía* alguna otra teoría. Por ejemplo, no existe por el momento modo conocido de contrastar la termodinámica relativista, lo que desde un punto de vista operacional la convierte en carente de sentido. Esto no importa, pues la teoría es estimada en provecho de la completud. Aun así, debería haber un medio de contrastar algunas fórmulas de la teoría. Deberíamos saber, por ejemplo, si la temperatura se transforma como una longitud (punto de vista usual) o como una energía (punto de vista correcto si se recuerda la relación con la mecánica estadística). Dado que actualmente no se dispone de mediciones para decidir la cuestión, hay que buscar en otra parte una contrastación empírica indirecta. Ésta la proporciona la mecánica estadística relativista en la medida en que implica a la termodinámica relativista —lo que hace sólo fragmentariamente. (Recuérdese la sección 2.6.) Y tampoco esta teoría es directamente contrastable, si bien se espera obtener muy pronto temperaturas extremadamente elevadas y datos de velocidades de chorro relevantes a ella. A su vez, el modo de contrastar la mecánica estadística relativista consiste en someter la mecánica relativista a contrastaciones empíricas. Es una contrastación incompleta, pues las suposiciones estocásticas auxiliares no se contrastan separadamente. Es más, ello implica varias teorías auxiliares. Pero así es como están las cosas: el ideal empirista de la teoría que, por poseer contenido empírico, hace frente por sí sola a los datos empíricos, no es sino un mito filosófico.

5.4. *Contrastaciones teóricas*

Toda teoría nueva promisoria se halla sujeta no sólo a contrastaciones empíricas sino también a contrastaciones puramente conceptuales. La contrastación conceptual de una teoría factual consiste, esencialmente, en un examen del modo como la teoría logra dar cuenta de la tradición válida, tanto científica como filosófica. Incluso una teoría revolucionaria, si es científica, no se rebelará contra todo sino que será compatible con la lógica, con la mayoría, si no la totalidad, de las matemáticas, y con diversas teorías factuales consideradas verdaderas en una primera aproximación. (El rumor originado por von Neumann y propagado por unos pocos matemáticos y filósofos, según los cuales la mecánica cuántica implica una revolución en la lógica, carece de base: cuando se axiomatiza esta teoría se advierte que presupone ciertas teorías matemáticas que llevan embutidas la lógica ordinaria. Además, si la mecánica cuántica obedeciera a una lógica propia, no podría unirse a teorías clásicas, v. g., la de Maxwell, para derivar enunciados contrastables.)

Si la nueva teoría cubre un territorio enteramente nuevo, con anterioridad no tratado por una teoría ya aceptada, entonces debería exigirse sólo que fuese *compatible* con el grueso del conocimiento anterior. Mas si la clase de referencia de la nueva teoría incluye la clase de referencia de una teoría menos amplia, y si ésta ha resultado particularmente verdadera, entonces se exigirá una condición más fuerte sobre el recién llegado. Se le exigirá que *incluya* la teoría antigua (en el sentido de la sección 3.4) o que, al menos, posea un *recubrimiento apreciable* (nótese la vaguedad deliberada) con aquélla en uno u otro "límite". Idealmente, la nueva teoría debería poseer todas las virtudes pero ninguno de los vicios y limitaciones de la antigua.

La condición de que la teoría nueva, más amplia, deba recobrar las partes correctas de la teoría que trata de superar, se denomina a menudo *principio de correspondencia*, que habitualmente se atribuye a Bohr. Bohr fue quizás el primero en enunciarlo explícitamente en relación con las teorías cuánticas y el primero en explotarlo sistemáticamente, si bien la regla fue empleada anteriormente, notablemente al comprobar (conceptualmente) la relatividad especial y general. Se su-

pone que el principio de correspondencia es un principio que subsume todos los principios empleados en una contrastación teórica preliminar. Pero, como se mostró en la sección 2, no toda teoría lo satisface.

Bohr y sus seguidores (en particular Feyerabend), han considerado el principio de correspondencia especial empleado al construir y comprobar la mecánica cuántica como una ley cuántica. Ello revela un análisis superficial de las leyes científicas, todas las cuales, se supone que conciernen a pautas objetivas más que a pares de teorías. En otras palabras, los principios de correspondencia son *metateóricos y heurísticos*, no principios intrateóricos (Bunge, 1961). Si fuesen leyes primarias, más que metaleyes, nos permitirían hacer predicciones. En todo caso, la intervención de tales enunciados metanomológicos en la evaluación de las teorías científicas muestra una vez más que las teorías se aquilatan a la luz conjuntamente de hechos e ideas. Varios requisitos, algunos de ellos de tipo filosófico, han de ser satisfechos por cualquier teoría nueva además de la adecuación factual. (Véase Bunge, 1967c, capítulo 15.)

6. Perspectivas equívocas sobre las relaciones interteóricas

6.1. *La opinión popular*

El punto de vista popular sobre las relaciones interteóricas es, como cualquier otra opinión popular, harto simple: supone que la sucesión histórica de las teorías científicas es *creciente*, en el sentido de que toda teoría nueva incluye (en lo que a su extensión respecta) a sus predecesoras. Según esta versión nada se pierde: todo lo que se agrega continúa como logro permanente, y, aún más, el proceso converge hacia un límite que es la unión de todas las teorías sucesivas. Puede lograrse una mayor plausibilidad para este punto de vista eligiendo subsecuencias extremadamente breves que se adecuen realmente a él. Son, por supuesto, las subsecuencias que figuran en los manuales standard, que sólo registran éxitos, nunca fracasos, y proclaman sin prueba que las teorías con mayor éxito contienen (de hecho o asintóticamente) a su predecesoras menos afortunadas.

La tesis popular es filosóficamente superficial, pues descuida los aspectos semánticos (los cambios de significado aludidos en las secciones 4.4 y 4.5), y, en cuanto hipótesis histórica relativa al avance de la ciencia, es falsa. Más aún, mezcla lógica e historia, dos polos que habría que matener separados –pero tal sucede también con otras dos perspectivas, la de Copenhague y la dialéctica, a las que nos referimos ahora mismo.

6.2. *El punto de vista de Copenhague*

Según la opinión de Copenhague, la mecánica cuántica no es una teoría más amplia que la mecánica clásica (entendiendo por ésta sólo la mecánica de partículas). El fundamento que se ofrece en esta argumentación es que carecería de sentido hablar de un microsistema, digamos de un átomo, como una cosa en sí: según Bohr y sus seguidores (Bohr, 1958a; Feyerabend, 1968), habría que hablar siempre de un bloque completo constituido misteriosamente por un microsistema, el dispositivo de medición (¿incluso si nos ocupamos de átomos en el espacio exterior?), y el sujeto a cargo del montaje experimental. La razón de ello parece clara: no tenemos acceso (experimental) al microsistema salvo mediante un aparato manipulado por alguien. Ahora bien, el aparato tiene que describirse en términos clásicos: es un macrosistema. Por lo tanto, concluye el argumento, la mecánica cuántica presupone la mecánica clásica e incluso la totalidad de la física clásica. Como se dice al comienzo mismo de un manual standard (Landau y Lifshitz, 1958): "La mecánica cuántica ocupa un lugar poco usual entre las teorías físicas: contiene a la mecánica clásica como caso límite [falso: recuérdese la sección 2.4], y al mismo tiempo requiere este caso límite para su propia formulación." Vimos anteriormente que la mecánica cuántica no contiene la totalidad de la mecánica clásica sino sólo un diminuto fragmento de la misma. Examinemos ahora la segunda tesis.

Este embrollado punto de vista posee dos raíces: el clasicismo y el positivismo. Más que admitir que los referentes de la mecánica cuántica son (o, más bien, fueron) entes inauditos, tanto más cuanto que no satisfacen los enunciados legales de la física clásica, el clasicista trata-

rá de seguir haciendo uso de analogías clásicas —tales como la posición, impulso, partícula y onda. No importa si eso le lleva a contradicciones como hablar sobre la difracción de partículas y la colisión de ondas: santificará el absurdo como principio —el principio de complementaridad. La segunda raíz de la versión de Copenhague sobre la presuposición de la mecánica clásica por la mecánica cuántica es aún más obviamente errónea: es la confusión del Círculo de Viena entre *referencia* y *contrastación* —confusión esclarecida hace ya algún tiempo (Feigl, 1967; Bunge, 1967b). Cierto es que para *contrastar* la mecánica cuántica o cualquier otra teoría, son necesarios algunos fragmentos de física clásica: recuérdese el cometido de las teorías auxiliares en la contrastación de teorías sustantivas (sección 5.2). Pero ello no entraña que, en la *formulación* de la mecánica cuántica, tenga uno que partir de la mecánica clásica —sólo para acabar concluyendo que ambas son, en realidad, mutuamente incompatibles. Tampoco entraña ello que carezca de sentido hablar de un microsistema aparte de un dispositivo de medición. La electrodinámica cuántica habla la mayoría de las veces de electrones libres, y cuando se computan niveles de energía de los átomos y las moléculas nadie toma en cuenta ningún aparato: simplemente las coordenadas del aparato no figuran en la mayoría de las fórmulas de las teorías cuánticas. En resumen, aunque la mecánica cuántica se contrasta con la ayuda de teorías que no son ciertamente compatibles con ella, éstas no figuran en su formulación. El punto de vista de Copenhague sobre las relaciones interteóricas es, en suma, una confusión más que debe ser eliminada.

6.3. *El punto de vista dialéctico*

Los filósofos dialécticos han sostenido que la sucesión histórica de ideas ha sido un proceso dialéctico por el que toda idea nueva ha asimilado a sus predecesoras y superado sus contradicciones internas, a la par que contenía al mismo tiempo su peculiar contradicción —el primer motor que, eventualmente, conduciría a su propia negación dialéctica. Toda nueva teoría con éxito mantendría en cuanto a sus antecedentes históricos la relación de subsunción dialéctica o *Aufhe-*

bung, en el sentido de que de alguna manera contendría a sus predecesoras bien que no en sentido "mecánico" (no como subteorías).

Es verdad que la advertencia de incompatibilidades, y, en particular, contradicciones, es una fuente importante de progreso científico, aunque no porque los científicos amen la contradicción sino más bien porque aprecian la coherencia, tanto interna como externa (esto es, coherencia de la teoría dada con el grueso del conocimiento humano). Pero ello no establece la tesis dialéctica. En primer lugar, en modo alguno está probado que *toda* teoría científica deba contener alguna contradicción. En verdad, las teorías transicionales —tales como la teoría elástica de la luz y la teoría cuántica clásica de Bohr— en ocasiones contienen contradicciones, pero nadie es feliz con ellas cuando se descubren. En segundo lugar, la opinión de que toda nueva teoría exitosa supera y, en un sentido, subsume parte de las antiguas teorías, es manifiestamente optimista. En ocasiones, la nueva teoría es netamente menos profunda que aquella con la que compite porque posee otras ventajas —por ejemplo, el caso de la termodinámica versus las teorías atomistas de la segunda mitad del último siglo. Más aún, no cabe excluir la posibilidad de que, bajo el yugo de una filosofía oscurantista, teorías nuevas pero inferiores remplacen a algunas de las presentes: el progreso teórico, por necesario que sea para mejorar nuestra comprensión y dominio de la realidad, de ningún modo es una necesidad lógica o histórica.

Pero, dejando a un lado la historia, la dificultad filosófica de la visión dialéctica de las relaciones interteóricas es que es confusa, por no haber sido analizada la relación de *Aufhebung*. Mas aún, resiste claramente al análisis en términos de la lógica o de la matemática, puesto que la dialéctica es no formal y su núcleo la contradicción (tensión, lucha) óntica. Tampoco la explicación inversa, de la lógica en términos de la dialéctica, es posible. Pues, si bien los dialécticos a menudo han alegado que la lógica formal es una especie de aproximación de la lógica dialéctica para bajas velocidades, la lógica dialéctica nunca ha sido formulada explícitamente y nunca se ha mostrado que incluya a la lógica formal. Además, la idea toda de una *lógica* dialéctica adecuada para dar cuenta de un mundo dinámico descansa en una confusión presocrática entre lógica y ontología: en el mejor de los casos, la dialéctica puede pretender ser una teoría ontológica y/o gnoseológica.

En todo caso, la relación *Aufhebung* no ha sido esclarecida y, por consiguiente, la versión dialéctica de las relaciones interteóricas es en sí misma oscura: es algo a ser explicado antes que teoría explicativa. Es por esto por lo que no ha contribuido al estudio de las relaciones lógicas, semánticas y metodológicas entre las teorías científicas —menos aún en combinación con el positivismo y la doctrina de Copenhague (como en Strauss, 1970): la composición de oscuridades no produce claridad.

7. Observaciones finales

No parece que por el momento se haya propuesto ninguna teoría general de las relaciones interteóricas. Contamos sólo con (*a*) un cálculo de los sistemas deductivos, la teoría de modelos y la teoría de las categorías, que, combinadas, atienden a las relaciones formales entre las teorías, y (*b*) un conjunto de observaciones desperdigadas sobre las relaciones no formales entre las teorías. Estas observaciones son, en su mayoría, esquemáticas e informales, y muy frecuentemente incorrectas. No sólo carecemos de un tratamiento sistemático de las relaciones interteóricas —aparte del lado formal de la cuestión— sino que los análisis detallados de pares de teorías específicas son pocos y están desfigurados por diversos mitos de manual. Peor: estamos presos en un círculo: no hay teoría general porque no tenemos suficientes estudios detallados de casos particulares, y tales estudios son escasos porque no hay teoría general que pueda aplicarse a ellos.

Y, aun así, es claro que poseemos algunos de los principales instrumentos para intentar realizar un análisis sistemático de las relaciones entre teorías, principalmente el cálculo anteriormente mencionado de los sistemas deductivos, la teoría de modelos, y la axiomática. Los análisis de amateur, que no hacen uso de estos instrumentos, pueden en el mejor de los casos dar lugar a algunas vislumbres valiosas. Pues sólo sistemas bien ordenados, con una estructura definida y un contenido comparativamente transparente, pueden compararse con provecho. Además, dado que las teorías son conjuntos infinitos de enunciados, sólo podemos manejar sus fundamentos axiomáticos y unos pocos teoremas típicos. La axiomatización, por tanto, es un requisito

previo a un análisis exacto de las relaciones lógicas y semánticas entre las teorías. Ello se aplica, en particular, al problema de la reductibilidad de una teoría a otra. Como dijo Woodger hace ya varios años —sin, no obstante, lograr la atención de los filósofos de la reducción— "Estrictamente hablando sólo podemos discutir fructíferamente tales relaciones interteóricas cuando ambas se axiomatizan pero, fuera de las matemáticas, esta condición nunca se satisface. De ahí la futilidad de tanta discusión sobre si la teoría T_1 es reducible a la teoría T_2 'en principio'. Tales cuestiones no pueden plantearse con discusiones de ese tipo sino sólo mediante la efectiva realización de la reducción, y esto no se hace ni puede hacerse hasta que las teorías hayan sido axiomatizadas" (Woodger, 1952).

En la medida en que se sostenga el absurdo credo de que una teoría científica no es un sistema hipotético-deductivo sino una síntesis inductiva, una metáfora, o lo que sea, y en la medida en que se sienta hacia la axiomática una aversión irracionalista, no pueden esperarse avances en el estudio de las relaciones interteóricas. Y mientras no dispongamos ni de cuidadosas historias de casos ni de una teoría general, deberíamos abstenernos de buscarle jugo filosófico a las relaciones interteóricas.

Capítulo 10

LA INTERACCIÓN TEORÍA/EXPERIMENTO*

Una teoría científica puede hacer contacto con la realidad al menos de tres maneras: (*a*) puede, en lo que a la verdad factual respecta, ser contrastada por medio de la experiencia (observación, medición, o experimento); (*b*) puede usarse para planear o interpretar observaciones, mediciones o experimentos; (*c*) puede emplearse con fines prácticos (no cognoscitivos) tales como construir o destruir un artefacto. Vamos a ocuparnos de los dos primeros tipos de contacto abordando el problema desde un punto de vista metodológico general, sin entrar en los tecnicismos de la inferencia estadística y el diseño experimental: nuestro propósito será primordialmente filosófico, a saber, acentuar la íntima trabazón entre teoría y experiencia, la cual refuta la presunción de que cualquiera de los dos polos es dominante.

Mostraremos que la contrastación de una teoría científica es un proceso complejo en el que cabe reconocer las siguientes etapas:

(i) La teoría se somete a contrastaciones preliminares de naturaleza no empírica, tales como la compatibilidad con un cuerpo aceptado de conocimiento;

(ii) la teoría es enriquecida con suposiciones subsidiarias hasta que se derivan predicciones específicas y se hipotetizan objetificadores o indicadores de los inobservables de que se ocupa;

(iii) se producen (más que se recogen) nuevos datos con la yuda de un conjunto de teorías auxiliares;

* Algunos parágrafos se reproducen de Bunge (1970d) con permiso del compilador y editor.

(iv) estos datos se confrontan con las predicciones teóricas y ambos se evalúan.

Pongamos manos a la obra.

1. En primer lugar vienen las contrastaciones no empíricas

1.1. *La concordancia con los hechos no es decisiva*

Según la filosofía oficial de la ciencia, la concordancia con los hechos no sólo es necesaria sino también suficiente para la aceptación de una teoría científica, porque las teorías científicas son sólo resúmenes de datos o, aún peor, resúmenes de datos y extrapolaciones a partir de ellos. Según esta opinión, si una predicción teórica entra en conflicto con un dato empírico es aquélla, no éste, la que ha de cambiar —y, además, sin apelación, pues la experiencia es el tribunal supremo. Esta opinión es metodológica, filosófica e históricamente insostenible. En primer lugar, porque es costumbre científica standard rechazar datos que entran en conflicto con teorías establecidas. En segundo lugar, porque la mayoría de las teorías no conciernen a observaciones y mediciones, menos aún a actos de percepción, sino a cosas o, más bien, modelos idealizados suyos. En cuarto lugar, porque —como veremos— las proposiciones contrastables rara vez se siguen de las suposiciones de una única teoría sino que, más bien, vienen por lo usual implicadas por la teoría en conjunción con suposiciones adicionales y con fragmentos de información distintos de los que sirven para comprobar la teoría, del mismo modo que la generalización "Todos los hombres son mortales" es insuficiente para concluir que Sócrates es mortal.

La opinión vulgar es también refutada por la historia de la ciencia, especie de experiencia que los filósofos de la ciencia deberían tener siempre en cuenta. En efecto, la historia de la ciencia abunda en ejemplos de teorías que se mantuvieron frente a pruebas empíricas adversas —y correctamente, pues los datos resultaron a la postre equivocados. Tal sucedió con las "anomalías" en todos los movimientos planetarios salvo el de Mercurio: no se interpretaron como refutación de la

mecánica celeste de Newton sino como índice de la incompletud de la información empírica disponible o de la dificultad de llevar a cabo cálculos exactos con esta teoría. Tal sucedió también con ciertas mediciones delicadas, realizadas por experimentadores competentes, que parecían refutar la constancia de la velocidad de la luz y, con ello, de la electrodinámica clásica y de la relatividad especial. Y tal acontece con toda teoría nueva que dé cuenta de un subconjunto apreciable de datos disponibles aun si entra en conflicto con alguno de ellos, con tal de que no haya a la vista ninguna teoría mejor: la prueba discordante se declara entonces residuo insignificante o, en el peor de los casos, una circunstancia lamentable, cuando no resueltamente falsa.

Tal sucedió con la teoría einsteniana del movimiento browniano, que fue decisiva en el establecimiento de la teoría atómica de la materia. En efecto, la teoría fue confirmada por las mediciones de J. Perrin pero fue refutada por las mediciones igualmente delicadas (pero, según resultó, mal interpretadas) de V. Henri (Brush, 1968). Fue aceptada, entre otras razones, por explicar el movimiento browniano (bien que fuese dudoso que lo predijera exactamente) y porque cuadraba con otras teorías tales como la teoría cinética de los gases y la teoría atómica química. En todo caso, la concordancia (o discordancia) con los hechos rara vez es suficiente para aceptar (rechazar) una teoría científica.

1.2. *Cuatro baterías de pruebas*

Nos guste o no, todo cuerpo orgánico de ideas científicas se evalúa a la luz de los resultados de cuatro baterías de pruebas: metateóricas, interteóricas, filosóficas y empíricas. Las tres primeras constituyen las pruebas no empíricas y las cuatro juntas pueden ofrecernos una indicación de la viabilidad o grado de verdad de una teoría (Bunge, 1961b, 1963, 1967c).

Un examen *metateórico* se ocupa de la forma y contenido de una teoría: tratará, en particular, de establecer si la teoría es internamente coherente (tarea no insignificante), si posee, tal como se la formula, un significado factual no ambiguo, y si es empíricamente contrastable con la ayuda de otros constructos, especialmente, hipótesis que rela-

cionen inobservables (v. g., causas) con observables (v. g., síntomas).

Un examen *interteórico* tratará de descubrir si la teoría dada es compatible con otras teorías previamente aceptadas —en particular, las lógicamente presupuestas por la teoría en cuestión. Esta compatibilidad se alcanza a menudo en algún límite de correspondencia, v. g., en valores grandes o pequeños de algún parámetro característico tal como la masa o la velocidad relativa.

La contrastación *filosófica* consiste en un examen de la respetabilidad metafísica y gnoseológica de los conceptos y suposiciones clave de la teoría a la luz de alguna filosofía. Así, si se adopta el positivismo, las teorías fenomenológicas —tales como la termodinámica, la teoría de la matriz *S* y la teoría conductista del aprendizaje— se verán favorecidas mientras que las teorías concernientes a la composición y estructura del sistema en cuestión se descuidarán e incluso combatirán sin tener en cuenta la prueba empírica ni los deseos de una explicación más profunda. No estoy defendiendo la censura filosófica sino recordando que, de hecho, siempre se tuvo en cuenta este tipo de consideración —en ocasiones para mejor, en ocasiones para peor (Hertz, 1956; Margenau, 1950; Bunge, 1961b, 1967c; Kuhn, 1962; Agassi, 1964).

Si se considera que una teoría cumple con los requisitos aceptados metateóricos, interteóricos y metafísicos, puede quedar lista para contrastaciones empíricas. (Que, de hecho, se conforme a los cánones es otro asunto. Y que logre suscitar la curiosidad de un experimentador competente, también es otro asunto.) Una contrastación *empírica* consiste, por supuesto, en una contrastación de algunas de las infinitas consecuencias lógicas de las suposiciones iniciales de la teoría, enriquecida con hipótesis subsidiarias y con datos, con alguna información obtenida mediante la ayuda de observaciones, mediciones o experimentos diseñados y leídos con ayuda de la teoría dada y de teorías adicionales. Así, para contrastar una teoría gravitacional nos centraremos en algunos de sus teoremas y construiremos, con algunos de los conceptos de la teoría, un modelo del sistema físico de interés, que incorporará sólo los aspectos relevantes de la cosa real; el paso siguiente consistirá en diseñar y ejecutar mediciones relevantes a ese modelo y basadas en teorías tales como la óptica y la mecánica.

1.3. *Prioridad de las contrastaciones no empíricas*

Ninguna teoría sufre un examen empírico a menos que se considere que ha pasado por las tres baterías de contrastaciones no empíricas. Es muy frecuente que algunas de estas contrastaciones no se lleven en realidad a efecto, bien por ser excesivamente difíciles (como sucede con las pruebas de coherencia), bien porque intuitivamente se percibe que la teoría satisface los requisitos no empíricos —impresión que, muy a menudo, resulta ser errónea. La incompletud de tales contrastaciones no disminuye su valor ni refuta nuestra afirmación de que las contrastaciones no empíricas preceden a las empíricas. En todo caso, las teorías demostrablemente incoherentes pueden hacerse a un lado sin escrúpulos, y las teorías totalmente descarriadas rara vez, si alguna, se toman en cuenta en lo que a las contrastaciones empíricas concierne. Dejando a un lado su originalidad, una teoría científica debe ser "razonable" y "verosímil", debe estar bien construida, no debe ir contra las creencias científicas justificadas, y no debe postular items que sean metafísicamente objetables (tales como la capacidad de un electrón para tomar decisiones) ni gnoseológicamente opacos (tales como una variable oculta sin posible manifestación pública).

En las tres contrastaciones no empíricas queda involucrada la coherencia: la coherencia interna, la coherencia con otras piezas de conocimiento, y la coherencia con principios filosóficos. La coherencia no es sólo virtud lógica sino también metodológica. En efecto, una teoría internamente incoherente puede predecir cualquier cosa y puede, por consiguiente, ser confirmada por elementos de prueba mutuamente incompatibles. Y una teoría que no esté de acuerdo con otras teorías no podrá gozar de su apoyo y recibir su control —como sucede con muchas ideas pseudo-científicas. Lo peor que le puede suceder a una teoría no es que sea refutada por experimentos que ella misma ha inducido, sino que permanezca flotando en el aire sin amigos ni enemigos.

Hemos de atender a la coherencia de nuestras teorías científicas con la filosofía dominante e, incluso, la totalidad de nuestra visión del mundo, pues la filosofía es, en efecto, relevante para la investigación

científica, y, en particular, para la selección de problemas de investigación, formación de hipótesis, y evaluación de ideas y procedimientos. Ni qué decir tiene que la sumisión a una filosofía errónea puede constituir un obstáculo para la investigación: así, la filosofía intuicionista bloqueó el avance de la psicología en algunos países, en especial, Alemania y Francia. Pero es un hecho que siempre se busca o valora la coherencia con la filosofía dominante —e incluso, se cree contar con ella cuando de hecho no sucede así, como lo ejemplifican las teorías relativistas y atómicas en relación con el positivismo. Ello hace tanto más necesarios el examen de los principios filosóficos. Mas tal ajuste entre ciencia y filosofía debería ser mutuo más bien que unilateral —so pena de agarrotar a ambos socios. El hecho de que sea necesario un matrimonio feliz y fructífero entre la filosofía y la ciencia lo hace aún más deseable. En todo caso, aunque hay filosofías no científicas, la investigación científica está penetrada por diversas ideas filosóficas (Bunge, 1967c).

2. Fase segunda: la teoría se apronta a la confrontación

2.1. *Las teorías, incontrastables aisladamente*

Hace un siglo, el gran Maxwell observó que, cuando se intenta contrastar candidatos a enunciados legales, no se abalanza uno hacia el laboratorio sino que se empieza haciendo un poco más de trabajo teórico: "la verificación de las leyes se efectúa mediante una investigación teórica de las condiciones bajo las que ciertas cantidades pueden medirse con la mayor exactitud, seguido de una realización de estas condiciones, y la medición efectiva de las cantidades" (Maxwell, 1871). Nótense las tres fases: diseño experimental (pieza de trabajo teórico) construcción del dispositivo, y realización de las operaciones empíricas. (Para detalles, véase Bunge, 1967c.) El diseño experimental involucrará hipótesis adicionales concernientes a los vínculos de una determinada magnitud (v. g., presión gaseosa, con la que puedan medirse (v. g., la longitud de una columna de líquido), a la vez que una representación teórica del dispositivo íntegro. Lo mismo se aplica, *a*

fortiori, al proceso de verificación de los sistemas de hipótesis, o sea, las teorías.

Es imposible someter una teoría científica a contrastaciones empíricas sin ligarla con otras teorías. Por de pronto, mientras que toda teoría cubre algunos aspectos de sus referentes (v. g., sus propiedades magnéticas), toda operación empírica comporta objetos reales que se rehúsan a hacer abstracción de todos aquellos aspectos que deliberadamente descuidan las teorías. En segundo lugar, una teoría puede en sí misma ser incontrastable por no referirse a hechos observables: puede limitarse a hacer aserciones sobre lo que sucede o puede suceder, sean o no observables los acaecimientos. (Sin embargo, puede tener contenido factual aunque puede que no contenido empírico.) Así, una teoría de circuitos eléctricos se refiere a corrientes eléctricas pero no enuncia las condiciones de su propia contrastación: ésta requiere una teoría adicional, a saber, la electrodinámica, que establecerá un vínculo entre inobservables, tal como la intensidad de corriente, con observables, tal como el ángulo de desviación de un medidor. En la mayoría de los casos, precisamos no de una teoría completa sino sólo de unos cuantos pedazos de diversas teorías.

Para decirlo de otro modo: las teorías científicas son *incontrastables en sí mismas* tanto por ser parciales cuando por implicar conceptos transobservacionales que no se vinculan, dentro de las teorías, con ningún concepto empírico. Estos vínculos, indispensables para contrastar una teoría, deben tomarse de alguna otra área de conocimiento. Así, una teoría psicológica se hará contrastable en la medida en que puedan adjuntársele indicadores (conductuales, fisiológicos, neurológicos, etc). En suma, si deseamos ver cómo se comportan nuestras teorías, debemos apelar a ideas adicionales en lugar de eliminar todo elemento teórico por medio de "definiciones operativas".

2.2. *Agregación de un modelo teórico del referente*

La adjunción de fragmentos de otras teorías es necesaria pero insuficiente para obtener resultados comparables con datos: puesto que en la práctica manejamos cosas individuales —un determinado cuerpo líquido más bien que el género cuerpo, este sujeto humano y no la hu-

manidad, y así sucesivamente— debemos agregar suposiciones *subsidiarias* concernientes a los detalles relevantes del sistema en cuestión. Por ejemplo, en el caso de un teorema de la teoría electromagnética, debemos agregar hipótesis especiales y datos concernientes a la forma, distribución de carga e imantación de las fuentes del campo.

Una teoría general no contiene tales suposiciones subsidiarias, precisamente por ser general. Es un marco amplio compatible con toda una familia de conjuntos de suposiciones subsidiarias. Todo conjunto semejante esquematiza un *modelo teórico* de la cosa que interesa. Todo modelo semejante se formula en el lenguaje de la teoría si bien ésta no lo dicta. Claro es, un modelo teórico puede, pero no precisa, ser visualizable: al ser construido con los conceptos de la teoría, será tan abstracto (gnoseológicamente hablando) como la teoría misma. Así, la mecánica clásica es compatible con una amplia variedad de modelos de sistemas planetarios; asimismo, es consistente con muchos modelos de líquidos: el modelo del medio continuo, el modelo cristaloide (de Ising) y así sucesivamente. Una teoría general no puede contrastarse con prescindencia de algún modelo —siempre que el modelo se considere como una imagen teórica de la cosa en cuestión más bien que como metáfora heurística.

2.3. *La importancia de las hipótesis específicas*

Una hipótesis subsidiaria concerniente a algún rasgo del objeto de estudio puede ocultar el valor de verdad de una teoría general, particularmente si son pocos los datos disponibles, como sucede a menudo, en el caso de una nueva área de investigación. Por ejemplo, supongamos que hay dos teorías rivales concernientes a la Q-idad de la materia —una propiedad física imaginaria. Cada teoría hipotetiza su propia relación funcional entre esta propiedad particular Q y el área A de la cosa en cuestión. La primera teoría supone que (en unidades apropiadas) $Q = \frac{1}{2}A^{1/2}$, mientras que la segunda postula que $Q = (2/A)^{1/2}$. Supongamos además que la medición produce los siguientes fragmentos de información: (*a*) e = Las dimensiones lineales D del objeto experimental son del orden de la unidad; (*b*) e^* = El valor de Q medido sobre el objeto experimental es 1.0 ± 0.2. Desgraciadamente, la

forma de la cosa no es observable: ha de conjeturarse. Es aquí donde hay que adjuntar una suposición subsidiaria: a fin de poner la teoría en movimiento debemos hipotetizar un modelo de la cosa —en este caso, un modelo visualizable de una cosa no vista. Supongamos que ocurre la siguiente situación:

$$e: D = 1$$

$H_1: Q = \frac{1}{2}A^{1/2}$	$H_2: Q = (2/A)^{1/2}$
S_1: La cosa es un disco	S_2: La cosa es una esfera.
$H_1, S_1, e \vdash Q_2 = \pi^{1/2}/4 \cong 0.4$	$H_2, S_2, e \vdash Q_2 = (2/\pi)^{1/2} \cong 0.8$

Claramente, el resultado de la derecha es consistente —dentro del error experimental— con el valor medido de Q, esto es, 1 ± 0.2. Pero sería necio rechazar H_1 por este motivo —pues, remplazando S_1 por S_2, desembocaríamos en $Q = \pi^{1/2}/2 \cong 0.9$, que es un valor de Q todavía mejor que Q_2. Este caso es por supuesto imaginario pero en modo alguno superficial. Moraleja: Vigílese el objeto modelo, pues un buen modelo puede salvar (temporalmente) una teoría general pobre, así como un modelo inadecuado puede arruinar (temporalmente) una buena teoría general.

2.4. *La suposición de modelos y su búsqueda*

Hay científicos teóricos que afirman, en prefacios y en observaciones finales, que toda teoría científica se "basa en" datos experimentales. Pero la lectura del trabajo emparedado entre las tapias empiristas muestra que eso no cuadra con tal filosofía. De hecho, se encuentra que —a menos que consista en una nueva teoría— el trabajo (*a*) o bien computa cantidades que pueden (en ocasiones) confrontarse subsecuentemente con resultados empíricos, o (*b*) combina determinados datos experimentales con un marco general a fin de inferir algún aspecto específico del sistema en cuestión. En cualquier caso, el trabajo parte de algún marco general más que de cero, aunque sólo sea porque el marco general sugerirá el tipo de información a buscar en el laboratorio o el campo. Así, se medirán o computarán energías y

secciones trasversales de dispersión —más bien que posiciones precisas, entropías y tensiones— en el caso de la dispersión de haces atómicos, porque la teoría general dice que las primeras cantidades son relevantes.

Más precisamente, en la ciencia teórica hay problemas directos y problemas inversos. Un *problema directo* se parece a esto: Dado a la vez un marco general y un modelo teórico específico del sistema en cuestión, encuéntrese sea una fórmula general de un cierto tipo, sea un caso de la misma. He aquí algunos ejemplos de la física. (*a*) Dada la mecánica clásica (marco de referencia general) y un modelo de fluidos definido (determinado, digamos, por una cierta distribución de masas, tensiones y fuerzas), compútese la trayectoria —una partícula arbitraria en el fluido (esto es, una línea de corriente). (*b*) Dada la mecánica cuántica (marco general) y el modelo standard del átomo de helio (un sistema de tres cuerpos mantenidos juntos por fuerzas de Coulomb), dedúzcase el espectro de la energía. (*c*) Dada la misma teoría general y el modelo usual de un campo central de fuerza, compútese la sección transversal de dispersión para un haz de características determinadas.

Los correspondientes *problemas inversos* serían éstos. (*a*) Dada la mecánica clásica y un conjunto de líneas de corriente, infiéranse las densidades de masa y fuerza a la par que el tensor de tensiones. (*b*) Dada la mecánica cuántica y una muestra de un espectro de energía, conjetúrense los constituyentes del sistema y las fuerzas entre ellos. (*c*) Dada la mecánica cuántica y una curva sección transversal *vs.* energía, inferir las fuerzas interpartículas. En todos los casos, el problema inverso es: Dado un cuerpo teórico general y ciertos datos empíricos, encuéntrese el modelo que mejor cuadre con ambos.

Para decirlo simbólicamente, la teoría general suministra una función f que relaciona el modelo hipotetizado m con una consecuencia contrastable t, esto es, $t = f(m)$. Así, en el caso del problema directo de la dispersión, t puede ser la diferencia de fase y m el hamiltoniano supuesto (equivalentemente, las fuerzas de interacción). Un problema inverso, en cambio, desemboca en encontrar la inversa f^{-1} de f, de suerte que se obtenga $m = f^{-1}(t)$. La inversión efectiva de f requiere la determinación de la información adecuada t, así como aplicar o inventar una técnica matemática adecuada. En ningún caso se da sola-

mente la información empírica, y menos aún se la busca: el mismo tipo de información tras el que va el experimentador viene más o menos sugerido por el marco general. Como observa un especialista bien conocido en problemas de dispersión, "La información más fácilmente accesible [la dispersión experimental] no nos ayuda en absoluto si no somos suficientemente astutos para encontrar un procedimiento que nos permita obtener el hamiltoniano a partir de ella" (Newton, 1966).

Si la teoría general es coherente y el problema directo se formula adecuadamente, y es soluble, tendrá una solución única. No así con la mayoría de los problemas inversos, que son característicamente indeterminados (Bunge, 1963). Esto vale particularmente para el problema de encontrar un modelo sobre la base de un marco general y un conjunto de datos: usualmente, los dos determinan conjuntamente una clase entera de modelos (v. g., hamiltonianos) más que un solo modelo. Para darse cuenta de la indeterminación peculiar a los problemas inversos (v. g., encontrar un modelo) no precisamos recurrir a las ambigüedades existentes en la física de partículas elementales (véase v. g., Newton, 1966). La encontramos en problemas elementales tales como el de determinar la intensidad y el voltaje de una corriente alternada a partir de mediciones, que sólo da valores medios.

2.5. *Esquema general*

Llamemos T_1 a la teoría a ser contrastada y S_1 al conjunto de suposiciones subsidiarias añadidas con el fin de derivar algunos enunciados T'_1, lo suficientemente específicos, como para estar cerca de la experiencia. S_1 incluirá un modelo teórico del sistema(s) en consideración y puede incluir suposiciones simplificantes tales como linealizaciones. La teoría T_1 —un conjunto infinito de enunciados— se juzgará sobre la base de la performance de los teoremas T'_1, que no son sólo finitos en número sino también parcialmente ajenos a T_1 aun si se formulan en el lenguaje de T_1. (Una razón más para rehusar identificar "teoría" y "lenguaje".) Nótese que la situación real, en la que T_1 y S_1 conjuntamente implican T'_1, es diferente de la opinión standard según

la cual T_1 por si sola produce T'_1, que a su vez debería ser directamente comparable con la evidencia empírica.

Por lo común, ni siquiera T'_1 será directamente contrastable, pues comportará conceptos teóricos tales como el de tensión (sea mecánica o psicológica) que carecen de contrapartida empírica. A fin de conectar T'_1 con la experiencia, debemos adjuntar un conjunto adicional de hipótesis, a saber, los objetivadores o indicadores de los entes y propiedades inobservables en cuestión. Así, la gravedad se objetiva por el movimiento y el apetito por la cuantía del alimento consumido. Llamemos I_1 al conjunto de indicadores u objetivadores empleados en llenar el vacío entre la teoría T_1 y la experiencia. Estos indicadores no son "definiciones operativas" sino *hipótesis* que deberían confrontarse independientemente aun si pueden pasar incuestionadas en el proceso de contrastar T_1. Son hipótesis diseñadas sobre la base del conocimiento disponible A como de la propia T_1 —pues la teoría en consideración debe decidir qué tipo de dato será relevante a la misma. En cualquier caso, una vez que está en marcha el proceso inventivo, debe ser posible mostrar que las hipótesis indicadoras están bien fundadas: que A y T_1 conjuntamente implican I_1.

Todavía necesitamos algunos enunciados empíricos particulares si hemos de derivar predicciones específicas. Llamemos E_1 al conjunto de datos que se introducen en la teoría. Con el fin de introducirlos en T_1 debemos traducirlos al lenguaje de T_1. Por ejemplo, los datos astronómicos, expresados originalmente en coordenadas geocéntricas, tendrán que traducirse a coordenadas heliocéntricas. Esta traducción de datos se hace con la ayuda de la misma T_1 y de algunos fragmentos del conocimiento antecedente A. Llamemos E_1^* al conjunto de datos formulados en el lenguaje de T_1 y listos para ser introducidos en ella. En una cuidadosa reconstrucción lógica, A, T_1, I_1, y E_1 implicarán E_1^*.

Finalmente, a partir de los teoremas particulares T'_1 y de los datos traducidos E_1^* obtendremos un conjunto T^* de consecuencias contrastables —no sólo de la teoría T_1 bajo examen sino de T_1 en conjunción con todas las suposiciones y datos restantes. T^* enfrentará las nuevas pruebas empíricas producidas para contrastar T_1.

En resumen, la preparación de la teoría T_1 para la contrastación empírica es como sigue.

Construcción de un modelo del referente	S_1
Deducción de teoremas particulares	$T_1, S_1 \vdash T'_1$
Construcción de indicadores	$A, T_1 \vdash I_1$
Traducción de datos	$A, T_1, E_1, I_1 \vdash E_1^*$
Obtención de consecuencias contrastables	$T'_1, E_1^* \vdash T^*$

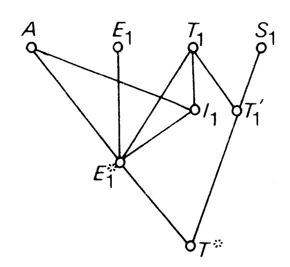


FIG. 1. La derivación de consecuencias contrastables de T_1 implica el conocimiento antecedente A, algunos datos E_1, un modelo S_1 y una hipótesis puente I_1.

3. FASE TERCERA: SE PRODUCE Y TRAMITA NUEVA EXPERIENCIA

3.1. *Interpretación de lo que vemos*

La tarea siguiente es producir un conjunto E^* de datos relevantes a las predicciones teóricas T^*. La ejecución de esta tarea requiere a menudo un trabajo teórico comparable en volumen al realizado en la fase previa.

Considérense las figuras de difracción de rayos X, instrumento empírico principal de análisis para los biólogos moleculares. Estas figuras carecen de sentido excepto en un contexto teórico: lo que ve uno son manchas oscuras y anillos concéntricos. Estas pautas no guardan relación obvia con la configuración espacial de los átomos en el cristal: sólo la teoría nos dice el significado de estos signos (naturales). Lo que se hace para leer tales figuras es hipotetizar una determinada configuración atómica (llamémosla T_1) con la ayuda de varios fragmentos de teorías físicas y químicas. Además, se admite que la teoría electrodinámica (llamémosla T_2) da cuenta de la naturaleza y comportamiento de los rayos X. A partir de T_1 y T_2 se computa (con

la ayuda de análisis de Fourier) la pauta de difracción teórica, esto es, la que se obtendría si tanto T_1 como T_2 fuesen verdaderas. Pero esta pauta es invisible: necesitamos, además, algún puente con la imagen observada. Las pautas de difracción pueden hacerse visibles por medio de planchas fotográficas sensibles. El mecanismo de este proceso viene explicado por una tercera teoría, a saber, la fotoquímica, que llamaremos T_3. Una figura de difracción de rayos X (un *dato* ciego) se convierte en elemento de prueba (*evidence*) a favor o en contra de una teoría de la estructura molecular T_1 cuando puede deducirse de ella con la ayuda de teorías auxiliares (óptica electromagnética y fotoquímica), una de las cuales explica el mecanismo de difracción, mientras que la otra explica el mecanismo de ennegrecimiento. En resumen, T_1, T_2 y T_3 conjuntamente implican E (véase la figura 2).

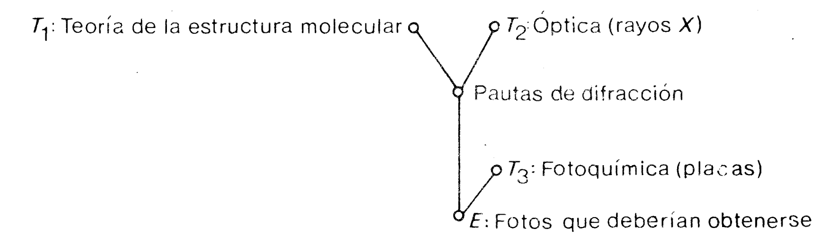


FIG. 2. Una figura de difracción tiene sentido si puede predecirse sobre la base de un modelo del cristal y con la ayuda de dos teorías auxiliares: una, que dé cuenta de la naturaleza de los rayos X, la otra, del proceso de ennegrecimiento.

El experimentador partirá, por supuesto, de la otra punta: producirá E y procederá a tratar de adivinar T_1 con la ayuda de las teorías T_2 y T_3, que, en este contexto particular, tomará por supuesto. El suyo es un problema inverso (véase la sección 2.4). Cuando el cristal es muy complejo, como sucede en el caso de una proteína, que contiene centenares de átomos, la tarea de conjeturar es muy intrincada —tanto que sólo una reducida fracción de las figuras de difracción de rayos X ha sido, descifrada hasta la fecha. Mas siempre puede lograr cierta ayuda de semejanzas con casos estudiados previamente. Más aún, para arrancar puede descartar deliberadamente mucha información empírica: puede comenzar con un instrumento de baja resolución, tal como el astrónomo parte a menudo con un telescopio de

escaso poder. A menos que haga tales simplificaciones puede que no obtenga pauta alguna —y una pauta es, desde luego, lo que busca. Así como un crudo modelo teórico es preferible a ningún modelo, así son preferibles datos digeribles a una indigestión de datos.

La tarea del cristalógrafo quedaría enormemente simplificada si la química teórica estuviera más avanzada: si fuera posible deducir todas las posibles configuraciones que puede asumir un conjunto cualquiera de átomos. Semejante cálculo detallado de posibles configuraciones moleculares requiere una cuarta teoría —la química cuántica— que se ha ocupado durante cuatro décadas de ello sin que, por el momento, esté todavía plenamente preparada para emprender tan formidable tarea. Cuando se cumpla semejante revolución, habrá que complementar el árbol lógico de la figura 2 con una rama que descienda de la química cuántica a T_1. El descubrimiento del "significado" de muchas de las imágenes de los rayos *X*, actualmente misteriosas, depende del desarrollo teórico más que de técnicas de observación y medición más finas.

3.2. *Conocimiento de lo que medimos*

Las instrucciones concernientes a las operaciones de laboratorio se expresan a menudo en un lenguaje pragmático que encubre su fundamento teórico, según cabe ilustrar con un ejemplo de la física clásica.

Toda medición de precisión implica mediciones eléctricas, y toda medición semejante implica la comparación de resistencias eléctricas. Una de las técnicas standard para comprobar resistencias eléctricas utiliza el puente de Wheatstone, *pons asinorum* de la instrumentación moderna. El diseño y funcionamiento de un puente de Wheatstone se basa en la teoría elemental de las redes eléctricas, cuyas leyes centrales son las de Kirchhoff y Ohm. La figura 3 representa de modo bastante directo un modelo teórico del puente de Wheatstone en estado de equilibrio, esto es, cuando no fluye electricidad a través del galvanómetro *G*.

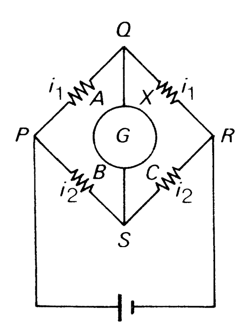


FIG. 3. El puente de Wheatstone, en combinación con la teoría de la red eléctrica, nos permite inferir X de A, B y C.

En estas condiciones, la segunda ley de Kirchhoff nos da

$$V_{PQ} - V_{PS} = 0$$

para la bifurcación de la parte izquierda y

$$V_{QR} - V_{RS} = 0$$

para la de la derecha. A su vez, cada una de estas diferencias de potencial es, por la ley de Ohm,

$$V_{PQ} = Ai_1, \qquad V_{PS} = Bi_2$$
$$V_{QR} = Xi_1, \qquad V_{SR} = Ci_2,$$

de donde la fórmula final

$$X = AC/B.$$

(El galvanómetro G que hace de puente entre los puntos Q y S del circuito no figura explícitamente como referente en estas fórmulas, porque registra la corriente nula.)

Las fórmulas precedentes pueden resumirse en el siguiente *enunciado físico*

F: En una de las ramas del puente de Wheatstone existe un punto S en el que el potencial eléctrico tiene el mismo valor que el potencial en un determinado punto Q de la otra rama.

El técnico empleará el siguiente *enunciado operacional* que traduce la precedente proposición al lenguaje de la acción humana:

O: Si uno de los terminales del galvanómetro en un puente Wheatstone *se conecta* con un punto *Q arbitrariamente elegido* en una de las ramas del puente, y si el otro terminal *se desplaza* a lo largo de la otra rama, se *encontrará* un punto *S* por el que la aguja del galvanómetro *se verá* que llega a detenerse en el cero de la escala.

(Las palabras en cursiva son, desde luego, los términos pragmáticos en la sentencia.) Aunque el técnico pueda quedar satisfecho con su enunciado operacional *O*, la única justificación posible de *O* es el precedente enunciado físico (y teórico) *F*. Más aún, *F* es el que condujo a Sir Charles a inventar su puente. (La mera observación de que no pasa corriente a través de *G* podría, en caso contrario, interpretarse como indicación de que el instrumento está descompuesto.) En general, por libre de teorías que pueda ser la experiencia ordinaria, no es posible en la ciencia ninguna experiencia de precisión sin teoría, aun cuando la descripción de la experiencia pueda no exhibir su dependencia respecto de la teoría. Cuanto más precisa es una medición, tanto más compleja es su teoría subyacente (Levi, 1947). Un análisis de dos mediciones típicas de la física moderna confirmará esta observación.

3.3. *La medición de probabilidades en la física atómica*

En el caso más simple —el que estudian los filósofos— las probabilidades se miden contando las frecuencias relativas. Pero las mediciones indirectas de probabilidades, esto es, vía fórmulas teóricas son igualmente frecuentes. Un buen ejemplo es la medición de la intensidad de una línea espectral como indicador u objetivador de una probabilidad de transición. (Para el concepto de indicador o hipótesis puente, véase la sección 2.5.) El vínculo entre las dos es el siguiente: Cuanto más probable sea una transición entre dos niveles de energía, tanto más intensa será la correspondiente línea espectral. Si la transición es altamente probable, se verá una línea brillante; si la probabili-

dad de transición es baja, una línea tenue, y si la probabilidad es nula, ninguna línea. (Si, pese a la teoría, se ve una línea allí donde debería estar ausente, entonces la transición correspondiente se denomina "prohibida" –llevándose a cabo la corrección adecuada en la teoría.)

Puesto que muchas líneas espectrales son visibles a simple vista, podría presumirse que, al mirar una de ellas, lo que de hecho se está observando es una probabilidad de transición. Ello podría pasar, a condición de tener en cuenta que semejante observación se encuentra muy empapada de teoría, hasta el punto de que sin ésta lo que se vería sería sólo una franja brillante de color. Después de todo, las transiciones en cuestión son saltos cuánticos de un nivel de energía al otro, y las probabilidades se calculan con la ayuda de fórmulas teóricas. Más aún, el experimentador debe diseñar el equipo (fuente de luz, red de difracción, planchas fotográficas, comparador de longitud de onda, etc.) de acuerdo con varias teorías (particularmente la óptica). Esto requiere no sólo la realización efectiva de las condiciones supuestas por las teorías implicadas (v. g., igual espaciamiento de las líneas de la red) sino también ciertas suposiciones que no pueden controlarse exhaustivamente. Entre éstas figuran explícitamente: la temperatura del arco no cambia de una fotografía a la siguiente, los átomos del arco en estudio entran en la corriente del arco a velocidad constante, y no absorben apreciablemente la luz emitida por los átomos de la misma especie. Una vez se han recogido y filtrado (criticado y tramitado) los datos empíricos, interviene la teoría para calcular las probabilidades de transicion en términos de las cantidades medidas. La fórmula empleada para inferir semejantes probabilidades de los resultados de la medición, es la ecuación de Einstein-Boltzmann. Las magnitudes mensurables que figuran en esta fórmula son la temperatura y la intensidad de la luz. Mientras que la primera puede medirse con gran exactitud, la desviación standard de los valores de la intensidad medida, está, incluso hoy, sobre no menos que el 30 %. El procedimiento completo es tan complicado e implica tantas incertidumbres que la primera tabla comprensiva y confiable de probabilidades de transiciones atómicas "experimentales" sólo se publicó en 1961 tras 30 años de trabajo en equipo (Meggers *et al.*, 1961).

3.4. *Medición de probabilidades en la física nuclear*

En la física nuclear, la probabilidad de un acaecimiento, tal como una reacción nuclear, está dada usualmente por la sección de choque total para ese acaecimiento: esto es así, una vez más, porque la correspondiente teoría (la mecánica cuántica) así lo dice. (Véase la figura 4.)

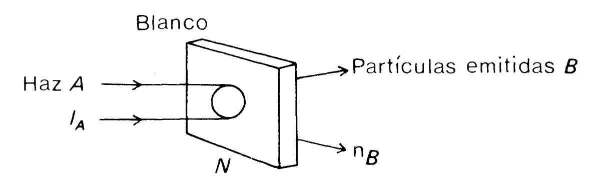


FIG. 4. Reacción nuclear $A \to B$. El número n_B de partículas emitidas se relaciona con el flujo incidente mediante la fórmula teórica: $n_B = I_A \sigma_{AB} N$, donde σ_{AB} es la sección de choque total para esa reacción y N el número de partículas blanco presentadas al haz.

En la sección transversal total no figura el ángulo de dispersión. Puesto que la intensidad dispersada depende del ángulo, es necesario considerar también la sección eficaz diferencial, o sección transversal por unidad de ángulo y unidad de intervalo de energía —concepto de nivel superior que sirve para definir la sección transversal total. En el laboratorio se mide la sección transversal diferencial respecto del marco de referencia del laboratorio. Si este valor ha de compararse con una predicción teórica, debe convertirse en un valor de centro de masa. Así traducido, un resultado de medición puede parecer, más o menos, lo siguiente (cifra aceptada en el momento de escribir): "A un ángulo de 20°8 y una energía de 156 MeV, la sección transversal de dispersión protón-protón en el centro de masa equivale a 3.66 ± 0.11." (Equipos diferentes de físicos obtendrán valores que difieren hasta en un 15 %.) En general, para la dispersión de partículas A por partículas B a la energía E y el ángulo ϑ_{cm}, se tendrá un enunciado de la forma

$$\sigma(A\text{–}B, E, \vartheta_{cm}) = n \pm \varepsilon,$$

donde *n* es un número (fraccionario) y ε el error total. Nótese cuán lejos de la experiencia sensible se halla semejante resultado de laboratorio: *A* y *B* nombran especies de partículas cuyos miembros son imperceptibles: se objetivan por medio de instrumentos que incorporan diversas teorías. La energía *E* se mide indirectamente y el ángulo de dispersión ϑ_{cm} se calcula a partir del ángulo medido. Finalmente, se llega al error ε con la ayuda de la estadística. En suma, el procedimiento experimental total está empapado de ideas teóricas, y la idea misma de sección eficaz de dispersión (distinta de la sección transversal geométrica) carece de sentido fuera de la microfísica.

3.5. *La prueba empírica, ni puramente empírica ni concluyente*

Contrariamente a la superstición popular, la ciencia hace poco uso de datos puros (no interpretados, o ateóricos), y ninguna prueba es definitiva en uno u otro sentido. Incluso los datos recogidos con la simple vista carecen de significado a menos que puedan incorporarse a un cuerpo de conocimiento, y todos se hallan sujetos a incertidumbre. Uno de los arqueólogos que tomaba parte en las excavaciones (1967) de lo que puede haber sido el legendario castillo Camelot del Rey Arturo declaró en un momento dado que él *pensó que podría ver hasta seis o siete* estratos diferentes de ruinas a las que, en ausencia de la leyenda, no habría mirado. Durante el siglo XIX, todos los astrónomos *veían* que las nebulosas (nuestras actuales galaxias) eran cuerpos continuos (gaseosos) en lugar de constelaciones de estrellas como *veían* los astrónomos de finales del XVIII. Y no vieron lo que cualquiera puede *ver* ahora por sí mismo, a saber, las nubes negras de polvo (v. g., en los anillos de las galaxias en espiral). No informamos sobre lo que vemos con ojos acéfalos sino que informamos, más bien, de lo que *creemos* ver: la observación científica, a diferencia de la observación de los bebés y de la filosofía empirista, está empapada de hipótesis y expectativas, algunas de ellas explícitas y la mayoría tácitas. Incluso la observación ordinaria viene determinada conjuntamente por la sensación y la ideación. La psicología experimental ha establecido que el mismo input sensorial puede dar lugar a diferentes percepcio-

nes mientras que, en circunstancias diferentes, sensaciones diferentes pueden corresponder a la misma percepción (Hebb, 1966).

La medición no elimina la incertidumbre observacional si bien un análisis de la medición, a la luz de la estadística matemática, puede determinar la incertidumbre con precisión. Éste es, en efecto, uno de los objetivos del cálculo de la desviación standard de los errores accidentales de observación. Pero no todos los errores son de este tipo: aparte de los errores sistemáticos incurridos en el diseño o funcionamiento de un equipo de laboratorio, se han de tener en cuenta posibles errores en la parte teórica de cualquier medición indirecta. Así, antes de la década de 1920, el tamaño de las galaxias resultó ser crudamente diez veces más pequeño que su tamaño real. Parecidamente, a principios de 1950 todas las distancias intergalácticas se vieron súbitamente multiplicadas por dos, cuando se encontró un error en los cálculos previos. Contrariamente, en ocasiones sucede que sabemos que hay algo equivocado en los datos y no podemos reconocer qué es. Así, en fecha tan reciente como 1967, los valores medidos del período de rotación de Venus pasaron de 5 días con el método óptico a 244 días con el método del radar (Smith, 1967).

En suma, no hay datos sólidos y duraderos: sólo hay cráneos duros que protegen la creencia en el carácter definitivo de los datos. Toda técnica experimental se basa en suposiciones que deberían someterse a comprobaciones independientes, y la implementación práctica de cualquier técnica semejante se halla sujeta a errores conceptuales y errores de percepción, así como a variaciones aleatorias objetivas tanto en el objeto como en el instrumento. Los datos empíricos no son más ciertos que las teorías relevantes a ellos; pero tanto los datos como las teorías, bien que inciertos, son corregibles.

3.6. *Esquema general*

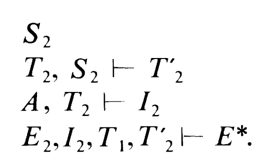
Toda operación empírica presupone un cuerpo A de conocimiento antecedente. A incluye, en particular, un conjunto E_2 de datos y un montón T_2 de fragmentos de teorías. Bien que E_2 y T_2 sean criticables en otras ocasiones, en la investigación empírica dada van sin cuestionar: se tomarán como autorizados, por lejos que estemos del autorita-

rismo. Sobre la base de A y, particularmente, de T_2, se diseñarán las hipótesis puente I_2 que permitan al experimentador objetivar inobservables e, inversamente, interpretar sus lecturas en términos teóricos. En resumen, A y T_2 implican I_2.

El paso siguiente es diseñar una observación o experimento, que implique I_2, cuyo resultado pueda ser relevante a la teoría T_1 que se somete a contrastación. (Ciertamente, hay mucha experimentación pobremente diseñada pero precisamente por esta razón posee poco valor y, aun si carece de finalidad, no puede separarse totalmente de toda teoría.) El diseño experimental implicará un número de hipótesis subsidiarias S_2 que esbocen un modelo teórico del equipo. De S_2 y T_2 se seguirán ciertas consecuencias T'_2 concernientes al funcionamiento del equipo durante las operaciones empíricas. En resumen, T_2 y S_2 conjuntamente implican T'_2.

Finalmente se realizarán las operaciones propiamente dichas. Llamemos E_2 a su resultado, o, más bien, a los informes empíricos una vez limpios y condensados con la ayuda de la teoría de los errores. Para tener sentido, E_2 debe leerse en términos de la teoría T_1 en contrastación y la teoría auxiliar T_2. Esto es, de T_1, T_2 (o, más bien, T'_2), I_2 y E_2 derivaremos un conjunto E^* de datos relevantes a T_1.

En resumen, tenemos el siguiente árbol:



Construcción de un modelo teórico del equipo	S_2
Deducción de teoremas particulares	$T_2, S_2 \vdash T'_2$
Construcción de indicadores	$A, T_2 \vdash I_2$
Traducción de datos	$E_2, I_2, T_1, T'_2 \vdash E^*$.

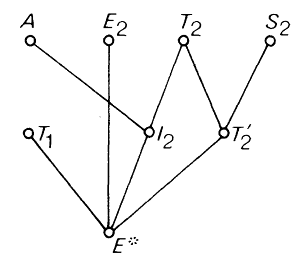


FIG. 5. Los datos crudos E_2 se cocinan y aderezan en términos teóricos con la ayuda del conocimiento antecedente A, la teoría T_2 y el modelo S_2 del equipo experimental, la hipótesis puente I_2, e incluso la misma T_1.

4. CUARTA FASE: LA TEORÍA ENFRENTA LA EXPERIENCIA

4.1. *Enunciados: teóricos y empíricos*

Estamos en posesión ahora de dos conjuntos de enunciados comparables: las predicciones teóricas T^* y la prueba empírica E^*. Nuestra tarea actual es confrontarlos a fin de obtener alguna conclusión plausible concerniente a la valía de la teoría substantiva T_1, responsable parcialmente de T^*. Pero antes de tratar de hacer esto debemos advertir que T^* y E^*, bien que comparables, no pueden coincidir, pues son de especies diferentes. Hay que acentuar este punto en vista de la opinión standard según la cual las T^* son sólo consecuencias de la sola T_1, mientras que E^* podría también estar contenida en T_1, siendo en todo caso el ideal la igualdad de estos dos conjuntos. (En puridad, las teorías vigentes de lógica inductiva [Carnap, 1950; von Wright, 1957; Lakatos, 1968] no se refieren a una teoría científica sino a una hipótesis aislada h y a una evidencia empírica e, e intentan computar el grado de conformación de h y la probabilidad del condicional "$e \Rightarrow h$" dados, la evidencia empírica e y el condicional "$h \Rightarrow e$". Nunca se mencionan ejemplos reales —ejemplos científicos— de ninguno de dichos condicionales, y la evidencia empírica se considera sacrosanta. Es más, no se da ningún método para asignar probabilidades a los enunciados.)

Insistamos que T^*, lejos de ser una muestra de T_1, se deriva de T_1 juntamente con un modelo definido (S_1), algunos datos (E_1) y algunas hipótesis puente (I_1). Igualmente E^*, lejos de ser un conjunto de puros enunciados empíricos, es una muestra de resultados interpretados de experiencias científicas: de lo contrario, no sería comparable con T^*. Aun así, E^* y T^* no se encuentran al mismo nivel, pues, lejos de ocuparse del objeto en sí, todo miembro de E^* se refiere a un par objeto —equipo experimental. (La interpretación de Copenhague de la mecánica cuántica pretende que esto vale también para todo enunciado teórico de esta teoría, pero ello es falso: (*a*) la teoría puede ocuparse de sistemas libres, esto es, cosas no acopladas a ningún dispositivo de medición, y (*b*) ninguna teoría general puede dar cuenta de las idiosin-

crasias de todo aparato concebible.) Cámbiese el aparato, o mejor, el dispositivo experimental, es probable que resulte un nuevo conjunto de datos E^*. Si no, es posible que se haya deslizado algún error. En todo caso, T^* y E^* no están en un pie de igualdad. El análisis siguiente aclarará sus diferencias.

Una predicción cuantitativa es un enunciado teórico sobre el valor de alguna "cantidad" (magnitud) Q de algún sistema real en un cierto estado. De hecho, el sistema descrito por la teoría no es la cosa real σ de la especie Σ de que la teoría pretende dar cuenta, sino un boceto idealizado o modelo teórico m de la misma. (En realidad, m es *un* modelo teórico del referente en un estado determinado.) En el caso típico, Q será una función real, de suerte que una predicción de un valor de Q tomará la forma

[1] $Q_s(m) = r$

donde el subíndice s indica la escala que se ha adoptado, mientras que el valor r de la función es algún número real. (Aún mejor, Q es una función real definida sobre el producto cartesiano del conjunto M de modelos por el conjunto S de escalas.) Hasta aquí, por lo que respecta a la predicción teórica.

El experimentador maneja la cosa real σ con una cierta técnica experimental t que implementa con una cierta sucesión a de actos. (En microfísica), más que un único sistema, habrá disponible un conjunto de sistemas similares. Pero no es éste siempre el caso: así, las reacciones nucleares individuales son "observables".) Sus resultados dependerán no sólo del objeto σ sino también de su técnica t y su implementación a. Más precisamente, un resultado de una única medición concerniente a la magnitud Q tomará la forma.

[2] $Q'_s(\sigma, t, a) = r'_a$

donde r'_a es de nuevo un número rara vez idéntico al valor teórico r. (Mejor aún; Q' es una función de valores racionales definida sobre el conjunto de cuádruplos ordenados $\Sigma \times S \times T \times A$.) El punto a notar es que la Q' medida y la Q teórica son *funciones totalmente diferentes*. No hay que sorprenderse de que rara vez tengan los mismos valores. (Recuérdese el capítulo 4, sección 2.2.)

Los valores medidos individuales [2] se tramitan entonces con la

ayuda de la estadística matemática. Los dos resultados más importantes son la desviación standard (una medida del error total) y el valor promedio, que ha de tomarse como una estimación del valor verdadero. Un enunciado sobre la Q' promedio tiene la forma

[3] $$\underset{a \in A}{AV}\, Q'_s(\sigma, t, a) = r'$$

donde la "$a \in A$" significa que se toma el promedio de una muestra A de mediciones. (Idealmente, A es infinita. Pero de hecho no lo es, por lo que no es estable. Pero sus fluctuaciones decrecen con el tamaño creciente de la muestra.) En general r' diferirá de cualquiera de los valores individuales [2].

Una vez se han computado el promedio y el error, el experimentador puede desear revisar una vez más sus datos crudos [2], para extirpar o, por el contrario, justificar cualquier dato anómalo que pueda haberse deslizado. Estas ovejas negras serán aquellos valores que se sitúen más allá de los límites convenidos de antemano (usualmente el límite de las 3 desviaciones standard). Pero si se encuentran demasiadas ovejas negras será necesario proceder a un examen crítico del procedimiento experimental. El experimentador puede encontrar entonces que no se han satisfecho algunas de las suposiciones —por ejemplo que, contrariamente a la hipótesis, todo acto de medición ha influido sobre el acto subsiguiente, esto es, que no se ha cumplido la condición de independencia estadística. En todo caso, el experimentador no acepta acríticamente sus propios resultados: los examina a la luz de la teoría metodológica (estadística matemática) y la teoría substantiva (v. g., mecánica). Y el teórico no debería alegar (como hacen las gentes de la escuela de Copenhague) que sus propias predicciones conciernen a valores medidos, pues en general no sabe qué técnica experimental ni qué pasos para implementarla se adoptarán.

4.2. *La confrontación*

Habiendo subrayado que T^* y E^* están separados por un abismo, tratemos ahora de cruzarlo. Sea E^* relevante a T^* pues de lo contrario podemos desembocar en una de las paradojas de la confirma-

ción. Bajo esta suposición hay sólo dos posibilidades: o bien E^* concuerda con T^* o no concuerda. Concordancia significa aquí menos que identidad y más que compatibilidad. Una predicción cualitativa tal como "El haz dispersado se polarizará" puede considerarse como confirmada si, de hecho, el haz resulta polarizado aunque sólo sea parcialmente. Pero si la predicción es cuantitativa, como sucede en el caso de "El grado de polarización del haz dispersado será p [un número comprendido entre 0 y 1]", entonces necesitamos una condición de verdad diferente. La adoptada tácitamente en física parece ser la siguiente. Sea

[4] $p: P(m) = x$

una predicción teórica concerniente a un modelo m de la cosa σ en un cierto estado, y sea

[5] $e: P'(\sigma, t) = y \pm \varepsilon$

el resultado de una sucesión de mediciones de P, sobre la cosa real σ, con la técnica t. El valor teórico es x, el promedio de los valores medidos es y, y la dispersión estadística de estos valores es ε. La predicción teórica p y el dato empírico e puede decirse que son *empíricamente equivalentes* si y sólo si el valor teórico x y el valor (promedio) experimental y difieren (en valor absoluto) en menos que el error experimental ε, tolerancia ésta convenida de antemano. En resumen (Bunge, 1967c)

[6] $Eq\,(p, e) =_{\mathrm{df}} |x - y| \leqslant \varepsilon$

El significado preciso de la relación de desigualdad dependerá del estado de las técnicas experimentales. Se dirá que un enunciado teórico y un enunciado empírico *concuerdan* si y sólo si son empíricamente equivalentes. Claramente, la identidad es un caso particular de concordancia.

Si la "abrumadora mayoría" de los datos E^* concuerdan con las predicciones teóricas T^*, entonces declaramos que T_1 es *confirmada* por ese particular conjunto de datos. Nótese, en primer lugar, que no exigimos que *todo* dato concuerde con la predicción correspondiente, y esto porque por fuerza figurarán datos anómalos que usualmente pueden descartarse. Pero desde luego debemos mantener nuestra

mente abierta a la posibilidad de que alguna oveja negra pueda, de hecho, ser blanca. Nótese también que la teoría en contrastación se declara como *confirmada por un cierto conjunto de datos*, y no simplemente *confirmada*: es un recordatorio de que las contrastaciones empíricas, por prolijas que sean, nunca son exhaustivas. En tercer lugar, nótese que no hemos especificado cuán fuertemente E^* confirma T^*. En la ciencia real no se computan grados de confirmación: el concepto usual de confirmación es comparativo y no cuantitativo.

¿Qué sucedería si, en cambio, E^* no concuerda con T^*, esto es, si hay un subconjunto apreciable $E'^* \subseteq E^*$ de datos que no se adecuan a las predicciones teóricas T^*? Tanto según los inductivistas cuanto según los refutacionistas rechazaríamos entonces T^* y también T_1: el desacuerdo con la experiencia refuta una teoría y, por consiguiente, nos obliga a rechazarla. Sin embargo, esto no está en línea con la práctica científica real. (Cf. Brush, 1974.) En la ciencia real no se acepta la evidencia desfavorable sin más ni más, sino que se la somete a un escrutinio crítico, pues cualquier dato puede estar distorsionado por factores diversos. A menudo sucede que la prueba desfavorable E'^* se rechaza bien por ser incompatible con teorías veteranas bien por provenir de un diseño experimental deficiente.

Si se descarta E'^*, entonces quedan dos posibilidades para la teoría T_1 en contrastación. Si T_1 es una teoría veterana, entonces deberíamos continuar haciendo uso de ella teniendo en cuenta los datos anómalos E'^* —pues, al fin y al cabo, podrían resultar no ser calumnias. Si, en cambio, T_1 no ha probado todavía su valía, al tiempo que la evidencia desfavorable es incierta, deberíamos entonces suspender el juicio sobre el valor de verdad de T_1 y esperar a una nueva cosecha de evidencia más confiable.

El resultado negativo E'^* debería aceptarse si la teoría auxiliar T_2 ha sido confirmada independientemente, si el diseño experimental pasa por un examen crítico, y si los datos no son, en su mayoría, valores aislados que pueden descartarse por las recetas de la estadística matemática. Pero la aceptación de las piezas de prueba desfavorables E'^*, aunque nos compromete a rechazar las predicciones T^*, no entraña la refutación de la teoría substantiva T_1. En efecto, para derivar las predicciones T^* se ha hecho uso de diversas premisas además de las de T_1: las hipótesis subsidiarias S_1 (incluyendo las que esquemati-

zan un modelo del objeto en cuestión), las hipótesis puente I_1 y los datos E_1. Nos enfrentamos con lo que se ha llamado el *problema de Duhem*: Dado un conjunto de premisas que implica un conjunto de consecuencias refutado (sustancial si no totalmente) por la experiencia, encuéntrese el subconjunto de premisas responsable del fracaso, con la finalidad de remplazarlo por otro más adecuado. Este problema parece ser mucho más importante que el problema de inventar y computar grados de confirmación.

En opinión de Duhem (Duhem, 1914), cuando una teoría no concuerda con los datos, pueden seguirse dos procedimientos igualmente legítimos. Uno es tratar de salvar las hipótesis centrales de la teoría mediante el agregado eventual de algunas suposiciones auxiliares relativas bien sea al referente de la teoría bien al montaje experimental. La segunda salida es corregir algunas o todas las hipótesis, sin tener la menor sospecha en cuanto a qué corregir en primer lugar ni de qué manera. Claro es, los racionalistas y los convencionalistas recomendarán la primera jugada mientras los empiristas favorecerán la segunda. En cualquiera de los casos, empero, las perspectivas parecen más bien pobres.

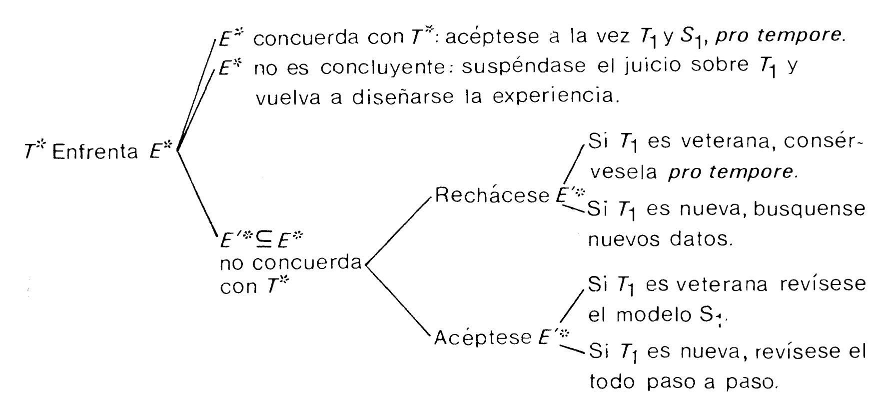
Nuestro análisis previo del modo cómo se deriva T^* (sección 2) confirma la complejidad del problema de Duhem pero al mismo tiempo sugiere que es posible resolverlo con tal de que se tome el cuidado de enunciar las premisas relevantes. Pues caso de ser la evidencia empírica adversa confiable, quedan de nuevo dos posibilidades: o bien T_1 resistió las pruebas en el pasado, o bien es novicia. En el primer caso, conservaríamos temporalmente T_1 y someteríamos las premisas restantes responsables de T^* a una crítica penetrante. De todas estas premisas, usualmente los datos E_1 y las hipótesis puente I_1, aunque falibles, se han comprobado previamente y en todo caso no suelen cuestionarse en el momento en que se cuestiona T_1. De ahí que los culpables hayan de encontrarse con mayor probabilidad entre las suposiciones subsidiarias S_1, sea el modelo teórico, sean las suposiciones simplificantes. Empezaremos entonces modificando éstas y/o modificando (por lo usual, en el sentido de mayor complicación) el modelo teórico. Sólo después de que hayamos probado sin éxito muchos modelos ampliamente diferentes deberemos dudar seriamente de la teoría T_1. Así, en el caso de las actuales teorías clásicas de líquidos, lo

que los teóricos hacen es seguir ensayando modelos más y más complejos de la estructura líquida al tiempo que retienen las leyes del movimiento y, en general, el marco íntegro de la mecánica clásica.

En cambio, si la teoría T_1 en contrastación es nueva o poco menos, entonces someteremos tanto T_1 cuanto S_1 a un examen exigente. Ahora bien, las premisas sospechosas no están sobre un pie de igualdad: es más probable que las más específicas sean falsas, pues asumen más riesgos y es menos probable que hayan sido contrastadas. Deberíamos comenzar, pues, cuestionando las premisas subsidiarias S_1 —en particular, el modelo teórico— y los axiomas más específicos de T_1. Los postulados más genéricos de T_1, aquellos que T_1 comparte con varias otras teorías, son los que menos probablemente requieran reformas, al menos con respecto al dominio en el que han sido confirmados en el pasado. (Cuando tales suposiciones extremadamente generales y profundas se muestran defectuosas, entonces es probable que manojos enteros de teorías sufran reformas.) En todo caso, no es necesario que la búsqueda del error sea azarosa: deberían proceder desde lo más nuevo y reducido a lo más viejo y amplio. Una axiomatización de la teoría que se examina debería ser extremadamente útil en esta búsqueda, pues entonces todas las presuposiciones y las suposiciones de la teoría quedarán expuestas a la vista de todos. Semejante organización axiomática del material teórico será particularmente útil si los tres tipos de premisas (las presuposiciones, los postulados genéricos, y los específicos) se separan claramente. (Véanse los capítulos 7 y 8.) Uno comenzará entonces a remplazar las varias suposiciones específicas una a una, observando el efecto de cada uno de tales cambios sobre las consecuencias contrastables T^*.

Eventualmente, se desembocará en un nuevo cuerpo T'^* de predicciones teóricas, cuerpo que concordará con la evidencia empírica total E^* o, al menos, con una parte apreciable de la misma. Cualquier cosa puede surgir de este trabajo de reajuste: un nuevo modelo teórico, y/o una teoría ligeramente diferente, o incluso, una teoría radicalmente nueva —o, todavía, un enfoque plenamente diferente de la construcción teórica. Criticar las teorías con espíritu constructivo, esto es, tratar de construir teorías mejores, es una de las experiencias más recompensantes —experiencias que se ahorran tanto dogmáticos como criticones.

En resumen, cuando E^* es relevante a T^*, el proceso de confrontación es éste:



5. Consecuencias

Si el precedente análisis es sustancialmente correcto, debemos abandonar la difundida creencia de que toda teoría enfrenta *por sí sola* a su tribunal empírico. En primer lugar, porque, para describir hechos observables específicos, una teoría debe recibir cierta información, un modelo, y un manojo de hipótesis que vinculen los inobservables con los observables. En segundo lugar, porque el mismo tribunal empírico se halla apoyado por un cuerpo de teoría, un modelo adicional (del dispositivo empírico) y algunas hipótesis puente. En resumen, la teoría en contrastación requiere hipótesis adicionales y experiencia pasada, tal como los nuevos datos propuestos requieren alguna teoría antecedente e hipótesis especiales adicionales. La teoría no vive sólo de los hechos, ni tampoco los datos son autosuficientes. Esto los hace comparables y mutuamente controlables.

Por consiguiente, es falso que, tal como lo afirman los inductivistas, toda teoría deba, en principio, *implicar* los mismísimos datos a partir de los cuales se indujo. No sólo no se urden las teorías científicas a partir de puros datos sino que por sí mismas no implican ninguno. Las teorías, por tanto, carecen de contenido empírico alguno. Sólo las hipótesis, tales como la ley de refracción de Snell y la ley de caída de los cuerpos de Galileo, podría decirse que producen, por mera especificación, cualquier número de datos —con tal que, por lo menos,

se les adjunte un ítem de información empírica y con tal que se vigile la diferencia profunda entre enunciados teóricos y empíricos. Pero las teorías a las que pertenecen estas dos hipótesis (la óptica ondulatoria y la teoría clásica de la gravitación) no son contrastables sólo por ejemplificación. En otras palabras, el condicional "$h \& e_1 \Rightarrow e_2$", que tiene algún sentido para hipótesis de bajo nivel, no puede exportarse al dominio de las teorías. En cuanto al condicional "$e \Rightarrow h$", carece de sentido para las hipótesis científicas, mucho menos para las teorías científicas, puesto que ningún conjunto de datos implica una hipótesis —aunque sólo sea porque las últimas pueden contener predicados que no figuran en los primeros. Pese a todo, es objetivo declarado de la mayoría de los sistemas de lógica inductiva evaluar el grado de confirmación (o probabilidad lógica) de condicionales de este tipo. Lo que explica por qué tales teorías son irrelevantes a la ciencia. Podemos agregar que, hasta ahora, la lógica inductiva no ha hecho frente al problema de diseñar medidas razonables del grado de confirmación de las teorías cuantitativas: se ha centrado en hipótesis sueltas e incluso aquí ha fracasado. Ello no prueba, por supuesto, que el objetivo mismo de la lógica inductiva sea quimérico, sino sólo que la construcción de sistemas de lógica inductiva relevantes para la ciencia es una tarea por realizar.

Una segunda consecuencia es que no puede haber evidencia *concluyente* alguna a favor o en contra de una teoría científica. Un conjunto de datos puede, ocasionalmente, confirmar o refutar una única hipótesis de modo tajante, pero es muchísimo menos potente en relación con una teoría. Mientras que el acuerdo entre teoría y experiencia (acuerdo en un dominio determinado, claro está) confirma a la primera, ello no indica con certeza la verdad de la teoría: puede indicar que tanto la teoría como los datos están sucios, v. g., que en ambos se han deslizado errores compensatorios. Y el desacuerdo entre teoría y experiencia tampoco puede interpretarse como una refutación clara de la primera. La confirmación y la refutación, por tajantes que puedan ser en el caso de hipótesis cualitativas sueltas —el único caso tenido en cuenta tanto por los inductivistas como por sus críticos— pierden mucho de su filo en el caso de las predicciones teóricas cuantitativas. Con ello no se dice que las teorías científicas son inatacables por la experiencia sino más bien que el proceso de su contrastación empí-

rica es complejo e indirecto. (Ello hace más valiosa la formulación coherente y explícita, esto es, axiomática de las teorías, ya que facilita el control de sus suposiciones.) Este carácter complejo y, a menudo, inconcluyente de la contrastación empírica refuerza el valor de las contrastaciones no empíricas, que son, en última instancia, pruebas de la coherencia global del cuerpo entero del conocimiento científico.

El inductivismo y el refutacionismo son, pues, inadecuados, pues ambos se restringen a hipótesis sueltas, ambos descuidan el modelo teórico que debe adjuntarse a una teoría general para deducir consecuencias contrastables, y ambos aceptan los prejuicios de que (*a*) sólo importan las contrastaciones empíricas y (*b*) el resultado de tales contrastaciones es siempre inequívoco. No obstante, el fracaso de las filosofías de la ciencia dominantes no debería arrojarnos en brazos del convencionalismo o de cualquier otra expresión filosófica de cinismo. Estamos autorizados a esperar que algunas de nuestras teorías sean interna y externamente coherentes y que posean, al menos, un grano de verdad, aun cuando no nos sea posible probar su corrección de manera indudable. Pues esta esperanza no es fe ciega: está fundada en el rendimiento de nuestras teorías —en su probada capacidad para marchar de acuerdo con otras teorías, para resolver problemas viejos y nuevos, para hacer nuevas predicciones, y para comprender nuevas experiencias e incluso hacerlas posibles.

En resumen: la teoría y la experiencia nunca chocan de frente. Se encuentran en un nivel intermedio, una vez se han agregado elementos adicionales teóricos y empíricos, en particular, modelos teóricos a la vez de la cosa en cuestión y del dispositivo empírico. Aun así, las contrastaciones empíricas no siempre son concluyentes y no nos permiten prescindir de las no empíricas. En la medida en que todo esto sea verdad, las filosofías de la ciencia dominantes son inadecuadas. Debemos empezar de nuevo, manteniéndonos más cerca de la investigación científica real que de las tradiciones filosóficas.

BIBLIOGRAFÍA

Abro, A. d': 1939, *The decline of mechanism*, Van Nostrand, Nueva York.
Agassi, J.: 1964, en Bunge, M. (ed.), 1964a.
Ayer, A. J.: 1968, en *Démostration, vérification, justification: Entretiens de l'Institut International de Philosophie*, Nauwelaerts, Lovaina.
Bastin, E. W. (ed.): 1971, *Quantum theory and beyond*, Cambridge University Press.
Beck, G., y H. M. Nussenzweig: 1958, *Nuovo Cimento* **9**, 1068.
Bergmann, P. G.: 1967, en Bunge (1967e).
Birkhoff, G., y J. v. Neumann: 1936, *Annals of Math.* **37**, 823.
Bohm, D.: 1951, *Quantum theory*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N. J.
Bohm, D., y J. Bub: 1966, *Rev. Mod. Phys.* **38**, 453.
Bohr, N.: 1934, *Atomic theory and the description of nature*, Cambridge University Press.
—: 1958a, *Atomic physics and human knowledge*, Wiley, Nueva York (hay trad. cast.: *Física atómica y conocimiento humano*, Aguilar, Madrid, 1964).
—: 1958b, en R. Klibansky (ed.), *Philosophy in the mid-century*, La Nuova Italia, Florencia.
Bourret, R.: 1964, *Phys. Letters* **12**, 323.
Boyer, T. H.: 1969a, *Phys. Rev.* **182**, 1374.
—: 1969b, *Phys. Rev.* **186**, 1304.
Bridgman, P. W.: 1927, *The logic of modern physics*, Macmillan Co., Nueva York.
Broglie, L. de: 1937, *Matière et lumière*, Gauthier-Villars, París.
Brush, S.: 1968, *Archive Hist. Exact Sci.* **5**, 5.
—: 1974, *Science* **183**, 1164.
Bunge, M.: 1955a, *Brit. J. Phil. Sci.* **6**, 1, 141.
—: 1955b, *Methodos* **7**, 295.
—: 1956, *Am. J. Phys.* **24**, 272.
—: 1957, *Am. J. Phys.* **25**, 211.
—: 1959a, *Causality*, Harvard University Press, Cambridge, Mass.; ed. rev.: 1963, The World Publ. Co., Cleveland y Nueva York (hay trad. cast.: *Causalidad*, Eudeba, Buenos Aires).
—: 1959b, *Metascientific queries*, Charles C. Thomas, Publ., Springfield, Ill.

—: 1961a, *Am. J. Phys.* **29**, 518.
—: 1961b, *Phil. Sci.* **28**, 120.
—: 1962a, *Intuition and science*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N. J. (hay trad. cast.: *Intuición y ciencia*, Eudeba, Buenos Aires).
—: 1962b, *The Monist* **47**, 116.
—: 1963, *The myth of simplicity*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N. J.
— (ed.): 1964a, *The critical approach*, Free Press, Glencoe, III.
—: 1964b, en Bunge (1964a) (hay trad. cast. en Bunge, *Teoría y realidad*, Ariel, Barcelona, 1972).
—: 1965, *Dialectica* **19**, 195.
—: 1966, *Am. J. Phys.* **34**, 585.
—: 1967a, *Foundations of physics*, Springer-Verlag, Nueva York.
—: 1967b, *Rev. Mod. Phys.* **39**, 463.
—: 1967c, *Scientific research*, 2 vols., Springer-Verlag, Nueva York (hay trad. cast. de M. Sacristán Luzón: *La investigación científica*, 1 vol., Ariel, Barcelona, 1969).
— (ed.): 1967d, *Delaware seminar in the foundations of physics*, Springer-Verlag, Nueva York.
— (ed.): 1967e, *Quantum theory and reality*, Springer-Verlag, Nueva York.
—: 1967f, *Brit. J. Phil. Sci.* **18**, 265.
—: 1968a, en I. Lakatos y A. Musgrave (eds.), *Problems in the philosophy of science*, North-Holland, Amsterdam (hay trad. cast. en Bunge, *Teoría y realidad*).
—: 1968b, *Intern. J. Theor. Phys.* **1**, 205.
—: 1968c, *Revue Internationale de Philosophie* **23**, 16 (hay trad. cast. en Bunge, *Teoría y realidad*).
—: 1968d, *Philosophy of Science* **35**, 355.
—: 1969a, *Proc. XIVth Intern. Congress of Philosophy* **III**, Herder, Viena.
—: 1969b, *American Philosophical Quarterly Monograph*, n.º 3, 62.
—: 1970a, *Can. J. Phys.* **48**, 1410.
—: 1970b, *Zeitschrift für allgemeine Wissenschaftstheorie* **1**, 196.
—: 1970c, en Weingarther y Zecha (1970).
—: 1970d, en Kiefer y Munitz (1970).
—: 1970e, *Studium Generale* **23**, 562.
—: 1971a, en Bastin (1971).
— (ed.): 1971b, *Problems in the foundations of physics*, Springer-Verlag, Nueva York.
—: 1971c, en Bunge (1971b).
—: 1972a, *Method, model, and matter*, D. Reidel Publ. Co., Dordrecht.
— (ed.): 1972b, *Exact philosophy: problems, methods, goals*, D. Reidel Publ. Co., Dordrecht.
—: 1972c, en Bunge (1972b).
—: 1974a, *Sense and reference*, D. Reidel Publ. Co., Dordrecht y Boston.

—: 1974b, *Interpretation and truth*, D. Reidel Publ. Co., Dordrecht y Boston.
—: 1979, *The Furniture of the World*, D. Reidel Publ. Co., Dordrecht y Boston.
—: 1979, *A World of Systems*, D. Reidel Publ. Co., Dordrecht y Boston.
—: 1980, *Epistemología*, Ariel, Barcelona.
Carathéodory, C.: 1909, *Math. Ann,* **67**, 355.
—: 1924, *Sitzber, Preuss. Acad. Wiss. Phys. - Math. Kl.*, 12.
Carnap, R.: 1950, *Logical foundations of probability*, University of Chicago Press.
—: 1958, *Introduction to symbolic logic and its applications*, Dover Publications, Inc., Nueva York.
Church, A.: 1962, en E. Nagel, P. Suppes y A. Tarski (eds.), *Logic, methodology and philosophy of science*, Stanford University Press.
Coffa, J. A.: 1967, *J. Phil.* **64**, 500.
Daneri, A., A. Loinger, y G. M. Prosperi: 1962, *Nuclear Physics* **33**, 297.
Destouches-Février, P.: 1951, *La structure des théories physiques*, Presses Universitaires de France, París.
Dirac, P. A. M.: 1958, *The principles of quantum mechanics*, 4.ª ed., Clarendon Press, Oxford (hay trad. cast.: *Principios de mecánica cuántica*, Ariel, Barcelona, 1967).
—: 1972, *Proc. Roy. Soc. Lond.* **A 328**, 1.
Duhem, P.: 1914, *La théorie physique*, 2.ª ed., Rivière, París.
Edelen, D. G. B.: 1962, *The structure of field space*, University of California Press, Berkeley y Los Ángeles.
Everett III, H.: 1957, *Rev. Mod. Phys.* **29**, 454.
Feigl, H.: 1962, *Phill. Sci.* **29**, 39.
—: 1967, *The 'mental' and the 'physical'*, University of Minnesota Press, Mineapolis.
Feyerabend, P. K.: 1962, en H. Feigl y G. Maxwell (eds.), *Minnesota studies in the philosophy of science*, III.
—: 1968, *Phil. Sci.* **35**, 309.
Fine, A.: 1968, *Phil. Sci.* **35**, 101.
Frank, P.: 1938, *Interpretations and misinterpretations of modern physics*, Hermann & Cie, París.
—: 1946, *Foundations of physics*, University of Chicago Press.
Freudenthal, H.: 1970, *Synthese* **21**, 93.
Grad, H.: 1967, en Bunge 1967d.
Groenewold, H. J.: 1968, *Foundations of quantum theory*, preprint of the Institute for Theoretical Physics, Groningen University.
Hebb, D. O.: 1966, *A textbook of psychology*, 2.ª ed., W. B. Saunders, Filadelfia (hay trad. cast.: *Psicología*, Importecnica, Madrid, 1968).
Heitler, W.: 1963, *Man and science*, Basic Books, Nueva York.
Helmholtz, H. v.: 1879, *Die Tatsachen in der Wahrnehmung*, Verlag Au-

gust Hirschwald, Berlín.
Hempel, C. G.: 1965, *Aspects of scientific explanation*, Free Press, Nueva York.
Henkin, L., P. Suppes, y A. Tarski (eds.): 1959, *The axiomatic method*, North-Holland, Amsterdam.
Hertz, H.: 1956, *The principles of mechanics*, trad. de P. E. Jones y J. T. Walley, Dover, Nueva York.
Hesse, M.: 1966, *Models and analogies in science*, Notre Dame University Press, Notre Dame, Ind.
Hilbert, D.: 1909, *Math. Ann.* **67**, 355.
—: 1912, *Phys. Zeits.* **13**, 1056.
—: 1913, *Phys. Zeits.* **14**, 592.
—: 1914, *Phys. Zeits.* **15**, 878.
—: 1918, *Math. Ann.* **78**, 405.
—: 1924, *Math. Ann.* **92**, 1.
Hooker, C. A.: 1972, en R. G. Colodny (ed.): 1972, *Paradigms and paradoxes*, Pittsburgh University Press, Pittsburgh.
Houtappel, R. M. F., H. van Dam y E. P. Wigner: 1965, *Rev. Mod. Phys.* **37**, 595.
Hutten, E.: 1956, *The language of modern physics*, Allen & Unwin, Londres.
Jost, R.: 1965, *The general theory of quantized fields*, Amer. Math. Soc., Providence, R. I.
Kiefer, H. y M. Munitz (eds.): 1970, *Contemporary philosophyc thought*, vol. 2, State University of New York Press, Albany, N. Y.
Kunhn, T. S.: 1962, *The structure of scientific revolutions*, University of Chicago Press (hay trad. cast. de Agustín Contin: *La estructura de las revoluciones científicas*, Fondo de Cultura Económica, Madrid, 1971).
Lakatos, I. (ed.): 1968, *The problem of induction*, North-Holland, Amsterdam.
Landau, L. y E. M. Lifshitz: 1958, *Quantum mechanics*, Pergamon Press, Oxford.
Landé, A.: 1965, *New foundations of quantum mechanics*, Cambridge University Press (hay trad. cast.: *Nuevos fundamentos de la mecánica cuántica*, Tecnos, Madrid, 1968).
Levi, B.: 1947, *Leyendo a Euclides*, Editorial Rosario, Rosario.
Ludwig, G.: 1967, en Bunge, 1967e.
Margenau, H.: 1936, *Phys. Rev.* **49**, 240.
—: 1950, *The nature of physical reality*, McGraw-Hill, Nueva York (hay trad. cast.: *La naturaleza de la realidad física*, Tecnos, Madrid, 1970).
—: y J. Park: 1967, en Bunge (1967e).
Mariwalla, K. H.: 1969, *Am. J. Phys.* **37**, 1281.
Marshall, T. W.: 1963, *Proc. Roy. Soc.* **A 276**, 475.
—: 1965, *Proc. Cambridge Phil. Soc.* **61**, 537.
Maxwell, J. C.: 1871, *Proc. London Math. Soc.* **3**, 224.

McKinsey, J. C. C., A. C. Sugar y P. Suppes: 1953, *J. Rational Mech. Anal.* **2**, 253.
Meggers, W. F., C. H. Corliss y B. F. Scribner: 1961, *Tables of spectral–line intensities*, National Bureau of Standards Monograph 32, Washington D. C.
Metzger, H.: 1926, *Les concepts scientifiques*, Alcan, París.
Miller, G. A.: 1967, *The psychology of communication*, Basic Books, Nueva York (hay trad. cast., Paidós, Buenos Aires).
Mises, R. von: 1951, *Positivism: A study in human understanding* [trad. inglesa de la edición alemana, 1939], Harvard University Press, Cambridge, Mass.
Nagel, E.: 1961, *The structure of science*, Harcourt, Brace & World, Nueva York (hay trad. cast., Paidós, Buenos Aires).
—: 1970, en Kiefer y Munitz (1970).
Neumann, J. v.: 1932, *Mathematische Grundlagen der Quantenmechanik*, Springer-Verlag, Berlín; trad. inglesa: *Mathematical foundations of quantum mechanics*, Princeton University Press, 1955.
Newton, R. C.: 1966, *Scattering theory of waves and particles*, McGraw-Hill, Nueva York.
Noll, W.: 1959, en Henkin *et al.*, 1959.
Pauli, W.: 1954, *Dialectica* **8**, 112.
Peña-Auerbach, L. de la: 1969, *J. Math. Phys.* **10**, 1620-1630.
Poincaré, H.: 1912, *Calcul des probabilités*, 2.ª ed., Gauthier-Villars, París.
Popper, K. R.: 1959, *Brit. J. Phil. Sci.* **10**, 25.
—: 1967, en M. Bunge, 1967e.
—: 1968, *Nature* **219**, 682.
Reichenbach, H.: 1924, *Axiomatik der relativistischen Raum-Zeit Lehre*, Fr. Vieweg und Sohn, Braunschweig; trad. inglesa: 1969, *Axiomatization of the theory of relativity*, University of California Press, Berkeley y Los Ángeles.
—: 1951, *The rise of scientific philosophy*, University of California Press, Berkeley y Los Ángeles (hay trad. cast.: *La filosofía científica*, Fondo de Cultura Económica, México).
Robinson, A.: 1956, *Complete theories*, North-Holland, Amsterdam.
Rosenfeld, L.: 1953, *Science progress*, n.º 163, 393.
—: 1961, *Nature* **190**, 384.
—: 1964, en L. Infeld (ed.), *Proceedings on theory of gravitation*, Gauthier-Villars, París.
Russell, B.: 1940, *An inquiry into meaning and truth*, George Allen & Unwin, Londres.
Salt, D.: 1971, *Foundations of physics* **1**, 307.
Schiller, R.: 1967, en Bunge, M. (ed.), 1967d.
Schilpp, P. A. (ed.): 1971, *The philosophy of Karl Popper*.
Schrödinger, E.: 1926, *Ann. Phys.* **79**, 489.

—: 1933, *Mémoires sur la mécanique ondulatoire*, Gauthier-Villars, París.
Seshu, S. y M. B. Reed: 1961, *Linear graphs and electrical networks*, Addison-Wesley Publishing Co., Reading, Mass.
Settle, T. W.: 1971, en Schilpp, 1971.
Shapere, D.: 1966, en R. G. Colodny (ed.): *Mind and cosmos*, Pittsburgh University Press, Pittsburgh.
Smart, J. J. C.: 1963, *Philosophy and scientific realism*, Routledge & Kegan Paul, Londres.
Smith, B. A.: 1967, *Science* **158**, 114.
Smoluchowski, M. v.: 1918, *Naturwiss.* **VI**, 253.
Stapp, H. P.: 1971, *Phys. Rev.* **D 3**, 1303.
Strauss, M.: 1970, en Weingartner y Zecha, 1970.
Suppes, P.: 1966, en *The role of axiomatics and problem solving in Mathematics*, Boston, Ginn and Co.
—: 1967, *Set-theoretic structures in science*, Institute for Mathematical Studies in the Social Sciences, Stanford University.
—: 1969, *Studies in the methodology and foundations of science*, D. Reidel Publ. Co., Dordrecht.
Tarski, A.: 1956, *Logic, semantics, metamathematics*, Clarendon Press, Oxford.
Tisza, L.: 1962; *Rev. Mod. Phys.* **35**, 151.
Truesdell, C.: 1966, *Six lectures on modern natural philosophy*, Springer-Verlag, Nueva York.
—: 1969, *Rational thermodynamics*, McGraw-Hill, Nueva York.
—: y R. Toupin: 1960, en S. Flügge (ed.), "The non-linear field theories of mechanics", *Handbook of physics*, III/1, Springer-Verlag, Berlín-Göttingen-Heidelberg.
Vaihinger, H.: 1920, *Die Philosophie des Als Ob*, 4.ª ed., Meiner, Leipzig.
Weingartner, P. y G. Zecha (eds.): 1970, *Induction, physics and ethics*, D. Reidel, Dordrecht.
Wheeler, J. A.: 1957, *Rev. Mod. Phys.* **29**, 463.
Wightman, A. S.: 1956, *Phys. Rev.* **101**, 860.
Wigner, E.: 1962, en I. J. Good (ed.), *The scientist speculates*, Heinemann, Londres.
Woodger, J. H.: 1937, *The axiomatic method in biology*, Cambridge University Press.
—: 1952, *Biology and language*, Cambridge University Press.
Wright, G. H. von: 1957, *The logical problem of induction*, 2.ª ed., Basil Blackwell, Oxford.

INDICE ONOMASTICO

INDICE TEMATICO

INDICE

El desarrollo y aplicación del conocimiento científico contemporanéo han dado lugar a una pléyade de estudios de interés general que han recibido el nombre colectivo de ciencia de la ciencia.

A la historia y la filosofía de la ciencia, ramas tradicionales y florecientes de la ciencia de la ciencia, se han agregado en los últimos tiempos estudios sobre los aspectos psicológicos, sociales económicos y políticos de la ciencia pura y aplicada, que influyen en alguna medida, en la planeación, financiación y organización de la investigación y de las ensañanzas científicas y tecnológicas.

Esta colección pretende recoger los resultados más importantes de la investigación contemporanéa, en el área de la ciencia de la ciencia, y proporcionar al público culto y científico una base para su perspectiva crítica de los fundamentos de la actividad científica y de la función que ejerce en el mundo actual. Y en consecuencia abarcará los diversos ambitos del saber, desde la matemática y la física hasta la ingeniería y la medicina, pasando por la biología, la psicología y las ciencias humanas.

Dado el creciente interés que despiertan los problemas del desarrollo científico-tecnológico-educacional, Ciencia de la Ciencia supone una valiosa aportación en los países de habla castellana.